



**António Pedro
Gonçalves Vilas-Boas**

**Sistema de Iluminação para Posicionamento em
Ambientes Interiores de um Agente Móvel**



**António Pedro
Gonçalves Vilas-Boas**

**Sistema de Iluminação para Posicionamento Indoor
de um Robô Móvel**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Doutor Luís Filipe Mesquita Nero Moreira Alves (orientador), Professor auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro, e do Doutor Pedro Fonseca (coorientador), Professor auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro.

o júri / the jury

presidente / president

Professor Doutor José Nuno Panelas Nunes Lau

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

Professor Doutor Vítor Manuel Ferreira dos Santos

Professor Associado da Universidade de Aveiro (arguente)

Professor Doutor Luís Filipe Mesquita Nero Moreira Alves

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)

agradecimentos

A todos os meus colegas, família e professores que me acompanharam nestes anos.

Palavras-chave

Comunicação por luz visível, Sistemas de Posicionamento, Díodos de emissão de luz

Resumo

A iluminação com tecnologia LED tem sido cada vez mais usada nos diferentes campos da tecnologia. De maneira a aproveitar as características que esta tecnologia nos oferece, esta dissertação apresenta um sistema de iluminação que serve para estimar a posição de um robô. Foram desenvolvidos neste trabalho um algoritmo de cálculo de posição compatível com a cabeça do robô usada, simulações Matlab do cálculo de posição do robô e otimização da distribuição das luminárias para minimizar o erro de posição. Por fim foi desenvolvido um circuito emissor LED de maneira a testar o algoritmo de posição na prática.

Keywords

Visible light communication, Positioning Systems, Light Emitting Diode

Abstract

LED lighting technology has been increasingly used in various fields of technology. In order to take advantage of the features that this technology provides, this thesis presents a lighting system that serves to estimate the position of a robot. It was develop in this work a position calculation algorithm compatible with the head of the robot used, Ma-tLab simulations of robot position calculation and optimization of the distribution of the light fixtures to minimize the position error. Finally it was developed an LED emitter circuit in order to test the position algorithm in practice.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
Acrónimos	ix
Acronyms	ix
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Enquadramento	2
1.3.1 Arquitetura conceptual	3
1.4 Resultados do trabalho	4
1.5 Estrutura do documento	4
2 Sistemas de Posicionamento em Ambientes Interiores Comunicação por Luz Visível	7
2.1 Posicionamento	8
2.1.1 História	8
2.1.2 Métodos de cálculo de posição	10
Triangulação	11

	Trilateração	12
	Sistemas Hiperbólicos	15
2.2	Sistemas de Posicionamento em Ambientes Interiores	17
2.2.1	Sistemas Comerciais existentes	18
	Rádio Frequência	18
	Bluetooth	20
	Impressões Magnéticas	20
	Fusão de Sensores	20
2.3	Comunicação por Luz Visível	21
2.3.1	História	21
2.3.2	Tecnologia LED	23
2.4	Sistemas de posicionamento em ambientes interiores por luz visível	28
2.4.1	Estudos científicos	29
2.4.2	Sistemas Comerciais	31
2.4.3	Comparação entre VLC, Wi-Fi e Bluetooth	32
3	Modelo Matlab	33
3.1	Introdução	33
3.2	Cálculo da posição através da potência	35
3.3	Algoritmos e Resultados	37
	Triângulo	41
	Quadrado	43
	Outras distribuições	46
3.4	Análise dos resultados	47
4	Desenvolvimento do sistema de iluminação LED com suporte para VLC	53
4.1	Arquitetura do sistema	53
4.1.1	Circuito emissor	53
	Driver	54

Oscilador	55
4.1.2 Recetor	57
4.2 Procedimentos Experimentais	58
4.2.1 Teste Experimental	59
4.3 Análise dos resultados	62
5 Conclusões e trabalho futuro	65
5.1 Conclusões	65
5.2 Trabalho Futuro	66
Bibliography	67
Bibliografia	67
A Anexos	70
A.1 Gráficos	70
A.1.1 Triângulo	70
A.1.2 Quadrado com 3 pontos de referência	71
A.1.3 Quadrado com 4 pontos de referência	71
A.1.4 Quadrado com centro com 3 pontos de referência	72
A.1.5 Quadrado com centro com 4 pontos de referência	72
A.1.6 Quadrado com centro com 5 pontos de referência	73
A.1.7 Pentágono com 3 pontos de referência	73
A.1.8 Pentágono com 4 pontos de referência	74
A.1.9 Pentágono com 5 pontos de referência	74
A.1.10 Pentágono com centro 3 pontos de referência	75
A.1.11 Pentágono com centro com 4 pontos de referência	75
A.1.12 Pentágono com centro com 5 pontos de referência	76
A.1.13 Pentágono com centro com 6 pontos de referência	76
A.2 PCB	77

A.3	Código	78
A.3.1	Matlab	78
	main	78
	Trilateration	79
	Position calculation	80
	Room view	84
A.3.2	Pic32	86

Lista de Figuras

1.1	Exemplo de sistema IPS baseado em VLC.	3
2.1	Sextante.	9
2.2	Triangulação	11
2.3	Trilateração	13
2.4	Sistemas Hiperbólicos	15
2.5	Imagem Google Maps de um centro comercial com GPS(esquerda)e com IPS(Direita).	19
2.6	Princípio de funcionamento do Photophone.	21
2.7	Variação da intensidade do LED com diferentes comprimentos de onda e materiais.	24
2.8	Lei de Haitz.	26
2.9	Crescimento do mercado LED em diversas áreas nos últimos anos.	27
3.1	Protótipo do recetor.	34
3.2	Distribuição lambertiana 3D.	35
3.3	Potência relativa nos 8 foto-díodos de acordo com a distância à fonte de luz.	36
3.4	Ângulo real e ângulo teórico calculado pelo recetor.	37
3.5	Fluxograma do algoritmo de simulação em Matlab	38
3.6	Cálculo da posição num ponto com 3 fontes de luz numa distribuição triangular com 2 m de raio	39
3.7	Mapa de erro com as luminárias em triângulo com 5m de lado	40

3.8	Evolução do erro de posição com triângulos de 5m, 1m e 0.5m de lado. . .	42
3.9	Gráfico dos erros de cálculo da posição para luminárias distribuídas em triângulo	42
3.10	Quadrado com 1m de lado usando todas as fontes de luz mais próximas como pontos de referência para calcular 1 ponto	43
3.11	Quadrado com 1m de lado usando as 3 fontes de luz mais próximas como pontos de referência	44
3.12	Quadrado com 1m de lado usando todas as fontes de luz mais próximas como pontos de referência	45
3.13	Gráfico dos erros de cálculo de posição com 3 e 4 pontos de referência . . .	46
3.14	Gráfico dos erros de cálculo de posição com vários pontos de referência . .	47
3.15	Gráfico dos erros de cálculo de posição com vários pontos de referência . .	48
3.16	Gráfico dos erros de cálculo de posição com vários pontos de referência . .	48
3.17	Gráfico dos erros de cálculo de posição com vários pontos de referência . .	49
3.18	Gráfico dos erros de cálculo de posição com vários pontos de referência . .	49
4.1	Circuito do driver usado para os LEDs	55
4.2	Circuito do oscilador usado	56
4.3	Circuito final do emissor	57
4.4	Fluxograma do algoritmo do recetor	57
4.5	Foto do set up usado.	59
4.6	Potência recebida em relação à distância no eixo xOy do recetor ao emissor.	60
4.7	Ângulo calculado pelo recetor vs ângulo simulado.	61
4.8	Mapa do erro de posição simulado.	62
4.9	Mapa do erro de posição calculada.	63
4.10	Diferença entre o mapa do erro de posição calculada e o mapa de erro da posição simulada.	64

Lista de Tabelas

3.1	Foto-díodos	34
3.2	Tabela de parâmetros constantes para simulação	39
3.3	Tabela das diferentes distribuições com menor erro médio.	50
4.1	Características das fontes de luz 1	58
4.2	Foto-díodos	59
4.3	Constantes do teste experimental	60

Acrónimos

VLC	Visible Light Communication
GPS	Global Positioning System
UHF	Ultra High Frequency
IPS	Indoor Positioning Systems
LED	Light Emitting Diode
Wi-Fi	Wireless Fidelity
TDOA	Time Diference of Arrival
RF	Rádio Frequência
BLE	Bluetooth Low Energy
CFL	Compact Fluorescent Light
HPA	Half Power Angle
IR	InfraRed
UV	Ultra Violet
FSO	Free Space Optics
PCB	Printed Board Circuit

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Sempre existiu uma necessidade de o Homem saber a sua posição e do que o rodeia. De maneira a poder sobreviver e a explorar o mundo foi necessário desenvolver métodos de localização. Com o avanço da matemática estes métodos foram evoluindo e finalmente com o avanço da tecnologia foram criados sistemas mais complexos como é o caso do GPS, sistema este que é usado atualmente por grande parte da população com os mais diversos propósitos. É um sistema que, como o nome indica, determina a posição de um objeto a nível global. Contudo tem limitações, o GPS não funciona num espaço interior pois utiliza ondas nas frequências da gama das UHF, o que faz com que muito dificilmente o sinal seja recebido em espaços interiores devido à imensa quantidade de obstáculos que existem e que afetam o sinal. O GPS funciona muito melhor se estiver em linha de vista com o recetor. Por isso, nos últimos anos, tem sido uma aposta crescente no mercado sistemas que localizam a posição de um objeto especialmente num espaço interior. Estes sistemas são designados IPS. Companhias como a Google, a Nokia e a Broadcom têm desenvolvido sistemas que permitem calcular a posição de uma pessoa dentro de edifícios através do uso de um smartphone e tecnologia Wifi, Bluetooth ou NFC. Contudo estes tipo de tecnologias implicam a implementação de infraestruturas específicas para o efeito. Com

os recentes avanços da tecnologia LED já é possível modular um sinal e enviá-lo através de um LED. Tendo isto em conta, da mesma maneira que os sistemas já existentes de IPS usam tecnologia Wi-Fi ou Bluetooth, também é possível usar a localização conhecida e o sinal emitido de uma fonte de luz para calcular a posição de um objeto dentro de um edifício. Um sistema assim teria a vantagem de aproveitar as infraestruturas de iluminação já existentes num edifício para calcular a posição.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho foi o estudo e desenvolvimento de um sistema IPS com recurso a VLC. As principais tarefas para atingir este objetivo foram:

- Estudo de soluções para localização e navegação em espaços interiores com recurso a tecnologia VLC para robôs;
- Estudar algoritmos de cálculo de posição que usam VLC – VLP (Visible Light Positioning);
- Simular em MatLab um sistema onde é calculada a posição de um ponto usando 3 ou mais luminárias no teto de uma sala e estudar diferentes distribuições e diferentes algoritmos;
- Validação dos algoritmos e soluções propostas em ambiente experimental;
- Comparar resultados simulados com práticos;

1.3 Enquadramento

Este trabalho enquadra-se num conjunto de dois trabalhos de dissertação, um com o objetivo de estudar e desenvolver um sensor de luz visível para localização e navegação de um robô móvel em espaços interiores. O trabalho apresentado nesta dissertação foi realizado tendo em conta as características deste sensor [1].

O objetivo dos dois trabalhos é desenvolver um sistema de IPS como o demonstrado na figura 1.1. Este trabalho focou a parte da luminária (emissor).

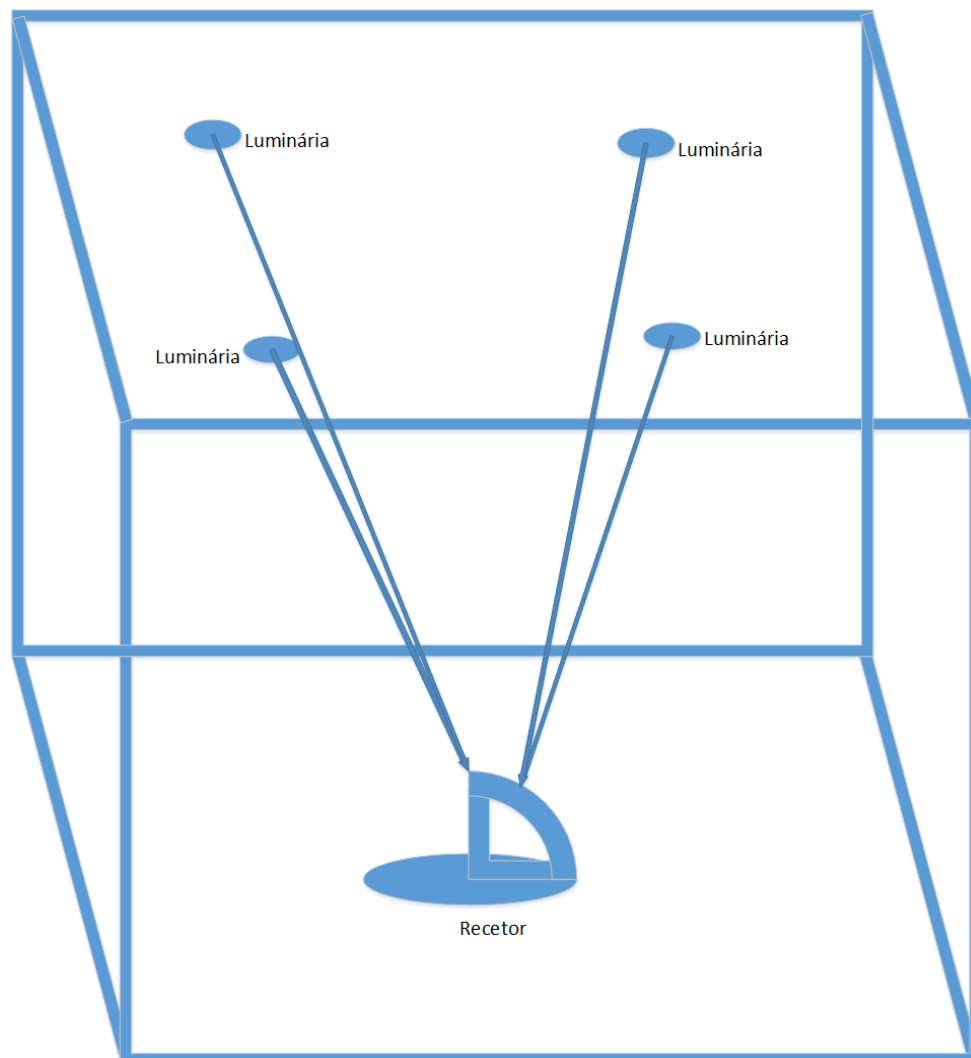


Figura 1.1: Exemplo de sistema IPS baseado em VLC.

1.3.1 Arquitetura conceptual

Neste trabalho irá ser utilizado um sistema com uma arquitetura composta por um sensor com vários foto-díodos dispostos em ângulos de elevação diferentes e o emissor será composto por várias luminárias LED que irão servir como pontos de referência para localização. Cada luminária irá emitir um código modulado na luz.

O sensor tem como objetivo calcular o ângulo de elevação que maximiza o sinal recebido. A partir deste ângulo de elevação e sabendo também a altura do espaço onde se encontra o sensor, é possível calcular a distância à fonte luminosa. Usando várias fontes luminosas é possível obter várias distâncias a pontos de referência de posição conhecida e assim aplicar métodos geométricos de cálculo de posição para localizar robô.

1.4 Resultados do trabalho

Foi feito e apresentado um poster A1 com alguns resultados das simulações, tanto da parte do emissor como da parte do recetor, para o evento Students Day do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro, onde vários alunos do departamento a realizar dissertação de mestrado puderam apresentar os seus trabalhos. Os autores do poster estiveram presentes a esclarecer dúvidas a professores e a estudantes interessados.

1.5 Estrutura do documento

Esta dissertação encontra-se dividida em capítulos que se organizam da seguinte forma:

O capítulo 2 começa por uma breve resenha histórica sobre a tecnologia LED. Também é referido o passado do VLC e dos sistemas IPS. De seguida são abordados sistemas que usam VLC com tecnologia LED para efetuar a localização em espaços interiores já existentes.

O capítulo 3 trata da parte de simulação em Matlab, desde os algoritmos implementados até aos resultados desses mesmos algoritmos.

O capítulo 4 apresenta a implementação prática do sistema e os seus resultados comparados com os simulados.

O capítulo 5 mostra observações e conclusões tiradas durante o projeto todo, assim como ideias para continuar a desenvolver este projeto no futuro.

Capítulo 2

Sistemas de Posicionamento em Ambientes Interiores Comunicação por Luz Visível

Comunicação por Luz Visível é um método de comunicação que usa ondas com comprimento de onda na região da luz visível. Com o recente avanço na tecnologia LED tornou-se possível usar este tipo de comunicação para enviar sinal através da modulação da luz de uma luminária.

Este avanço na Comunicação por Luz Visível também permitiu avanços na tecnologia de posicionamento em ambientes interiores. Cada vez mais se tem apostado em iluminação com tecnologia LED e prevê-se que no futuro as fontes de iluminação LED estarão em todo o lado. Por isso, o uso de comunicação por luz visível em sistemas de posicionamento em ambientes interiores apresenta a vantagem de não necessitar de novas infraestruturas pois em todo o lado é necessário iluminação, apenas será necessário adaptar as luminárias para ter funções de comunicação. Este capítulo pretende sumarizar o que é a comunicação por luz visível antes e depois do LED, o que são sistemas de posicionamento e como as duas tecnologias são usadas atualmente em conjunto.

2.1 Posicionamento

2.1.1 História

O ser humano consegue distinguir 4 dimensões sendo elas o tempo e as 3 dimensões espaciais dos eixos x, y e z. Por isso, sempre foi muito importante para o ser humano saber localizar-se nestas dimensões. Nos tempo primitivos usava-se pontos de referência e mesmo quando houve a revolução marítima a localização era possível se fosse perto da costa. Com viagens mais longas em alto mar foi necessário arranjar outros pontos referência, as estrelas, e aplicando conhecimentos de geometria inventou-se o sextante, como por exemplo o da figura 2.1. Um aparelho baseado no alinhamento da posição das estrelas e do horizonte que permitia saber a localização, contudo apenas conseguia calcular a latitude. Uma das maneiras mais precisas de calcular a longitude era o tempo, visto que a terra roda 360° graus por dia, há uma relação direta entre o tempo e a longitude. Se um observador souber o tempo a que ocorreu um determinado evento num ponto de referência e comparar com o tempo atual na sua posição, consegue saber a sua posição relativa a esse ponto de referência. No caso da navegação marítima não havia relógios que conseguissem medir o tempo durante a viagem e por isso foram criados vários métodos para calcular o tempo num determinado ponto, tais como, o método de Galileu que usava as luas de Júpiter e o método de distâncias lunares que usa o ângulo entre a lua e outro objeto celeste. Só no séc. XVIII é que John Harrison inventou o cronómetro marinho que servia para medir o tempo de referência durante a viagem marítima, evitando assim as medições e cálculos anteriormente necessárias para calcular o tempo de referência.

Os métodos das distâncias lunares foi dos mais utilizados para calcular a posição durante muito tempo, contudo, o avanço da tecnologia, motivado pelas crescentes necessidades do Homem de obter estimativas de posição mais precisas e exatas, levaram este métodos a tornarem-se obsoletos.

No início do séc. XX, observaram-se alguns métodos de localização de objetos com recurso a ondas sonoras, um desses exemplos é o SONAR que usa ondas sonoras para

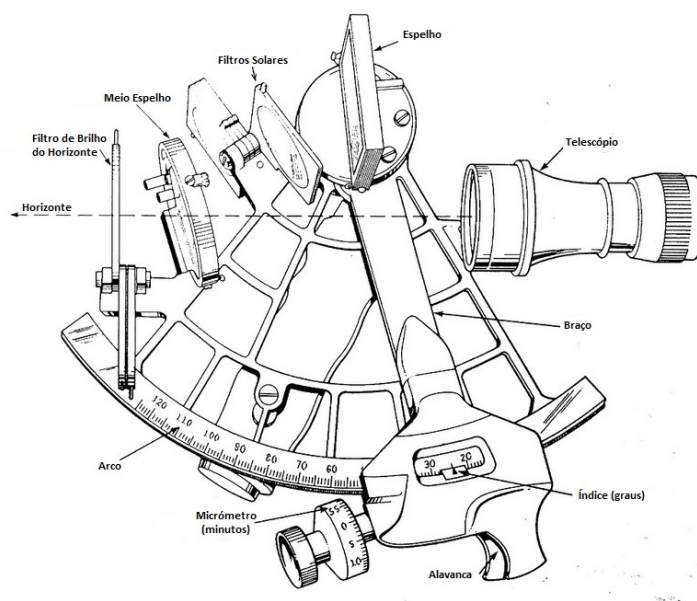


Figura 2.1: Sextante.

detetar a presença de objetos. Vários sonares conseguem triangular a posição do objeto. Militares britânicos criaram um sistema semelhante para detetar aviões em condições de pouca visibilidade. Outro método que usa ondas sonoras consiste em usar o tempo de chegada de várias ondas sonoras, TDOA, que partem de emissores de posição conhecida. Este métodos são designados por métodos de localização acústica.

Mais tarde, com o desenvolvimento da rádio frequência começou-se a usar ondas rádio para calcular a posição com os sistemas de navegação hiperbólicos. O primeiro sistema usado foi o GEE, usava a diferença do tempo de chegada de ondas rádio para calcular a posição e foi usado e desenvolvido pela Força Aérea Britânica durante a 2^o guerra mundial. Por volta da mesma altura o MIT Radiation Laboratory nos Estados Unidos da América desenvolveu o LORAN que tem o mesmo principio de localização que o GEE mas usava ondas de frequências mais baixas, permitindo atingir maiores distâncias. Ambos os sistemas não tinham muita precisão e eram apenas bi-dimensionais. Ainda durante a 2^o guerra mundial foi desenvolvido e usado o sistema Decca que usava a diferença das fases dos sinais recebidos, o que permitia uma maior precisão no cálculo de posição. O último sistema a usar a diferença entre duas ondas rádio recebidas foi o Omega criado nos Estados Unidos

da América, também usava a diferença de fases e foi o primeiro sistema de posicionamento com alcance suficiente para funcionar a nível global.

Com o desenvolvimento da tecnologia eletrónica e aeroespacial foram desenvolvidos satélites e em 1960 criou-se o primeiro sistema de navegação por satélite, o TRANSIT. Usava 7 satélites e era possível saber a posição com alguma precisão mas apenas de hora em hora o que o tornava impraticável para sistemas de transporte rápidos como os aviões. Até que em 1995 o sistema GPS ficou completamente operacional, usava 24 satélites que tinham sido lançados desde 1978, e é capaz de calcular a posição em qualquer ponto na terra, independentemente das condições meteorológicas, a qualquer hora e com grande precisão desde que pelo menos 4 satélites não tenham linha de vista obstruída. O GPS começou por ser um projeto militar, contudo, hoje em dia existem 31 satélites e qualquer pessoa pode usar o sistema com um smartphone ou um aparelho GPS.

O GPS foi um grande passo em sistemas de localização, contudo não satisfaz todas as necessidades do Homem, nomeadamente em espaços interiores. Como referido anteriormente, o GPS precisa de pelo menos 4 satélites sem linha de vista obstruída, e isso não acontece em espaços completamente fechados como por exemplo dentro de casa ou num centro comercial, daí a necessidade de haver sistemas de posição que funcionem em espaços interiores nasceram os IPS.

2.1.2 Métodos de cálculo de posição

Existem vários métodos de cálculo de posição, o posicionamento sempre foi alvo de estudos por parte da comunidade científica e há sempre novas métodos matemáticos de minimizar o erro na localização de um ponto desconhecido. De seguida irão ser apresentados diferentes métodos geométricos de cálculo de posição que podem ser aplicados em sistemas de posicionamento. A principal fonte de erro destes métodos encontra-se na medição das respetivas variáveis.

Triangulação

Triangulação é um método geométrico de localização que usa ângulos para calcular a posição de um ponto, como é possível observar na figura 2.2.

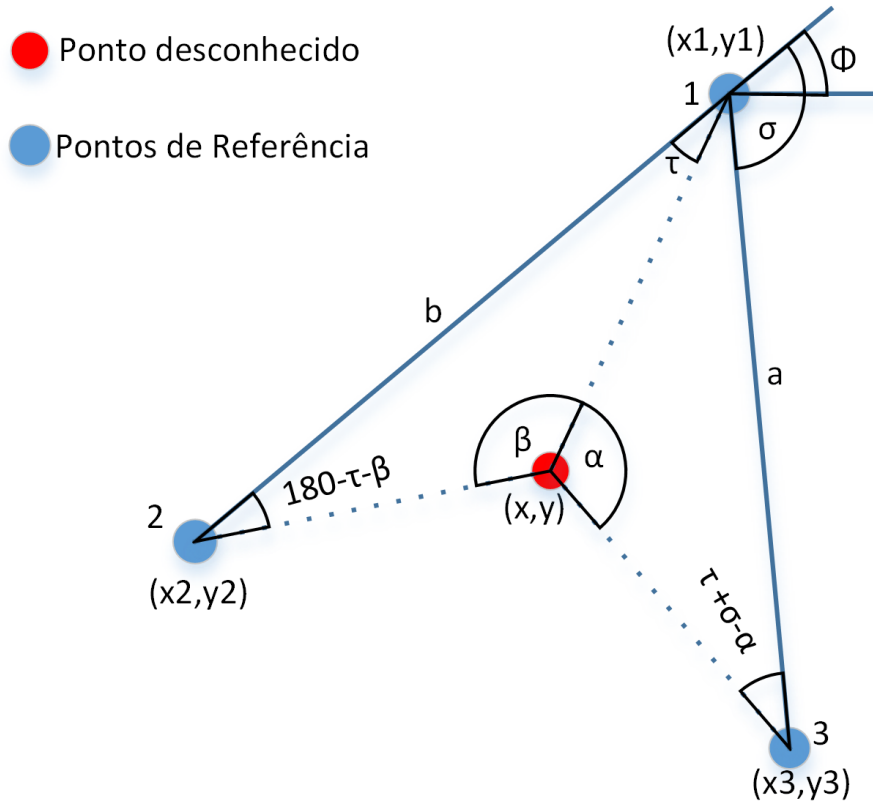


Figura 2.2: Triangulação

Sabendo os ângulos que separam os 3 pontos de referência entre si e alguns ângulos em relação à orientação do eixo do x positivo, é possível calcular a posição do ponto desconhecido através das seguintes equações [2]:

$$\tau = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \beta - \frac{a \sin(\beta)}{b \sin(\alpha)} \sin(\sigma - \alpha)}{\frac{a \sin(\beta)}{b \sin \alpha} \cos(\sigma - \alpha) - \cos \beta} \right) \quad (2.1)$$

$$d = \frac{b \sin(\tau + \beta)}{\sin \beta} \quad (2.2)$$

$$x = x_1 - d \cos(\phi + \tau) \quad (2.3)$$

$$y = y_1 - d \sin(\phi + \tau) \quad (2.4)$$

d representa a distância entre o ponto desconhecido e o ponto de referência 1.

Num sistema de posicionamento, a principal fonte de erro encontra-se na medição dos ângulos.

Trilateração

Trilateração é um método geométrico de localização que usa distâncias para calcular a posição de um ponto.

Como é possível observar na figura 2.3, se for conhecida a distância do ponto que queremos calcular a pelo menos 3 pontos de referência, podemos calcular a posição de um ponto.

Assumindo d_1 , d_2 e d_3 como as distâncias do ponto a ser calculado a cada um dos três pontos de referência e (x, y) , (x_1, y_1) , (x_2, y_2) e (x_3, y_3) como a posição do ponto a ser calculado e as posições conhecidas dos pontos de referência, obtêm-se as equações (2.5), (2.6) e (2.7):

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = d_1^2 \quad (2.5)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = d_2^2 \quad (2.6)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = d_3^2 \quad (2.7)$$

Através da diferença termo a termo entre a equação 2.5 e as equações 2.6 e 2.7 obtêm-se as equações 2.8 e 2.9:

$$x(-2x_1 + 2x_2) + y(-2y_1 + 2y_2) = d_1^2 - d_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2 \quad (2.8)$$

$$x(-2x_1 + 2x_3) + y(-2y_1 + 2y_3) = d_1^2 - d_3^2 - x_1^2 + x_3^2 - y_1^2 + y_3^2 \quad (2.9)$$

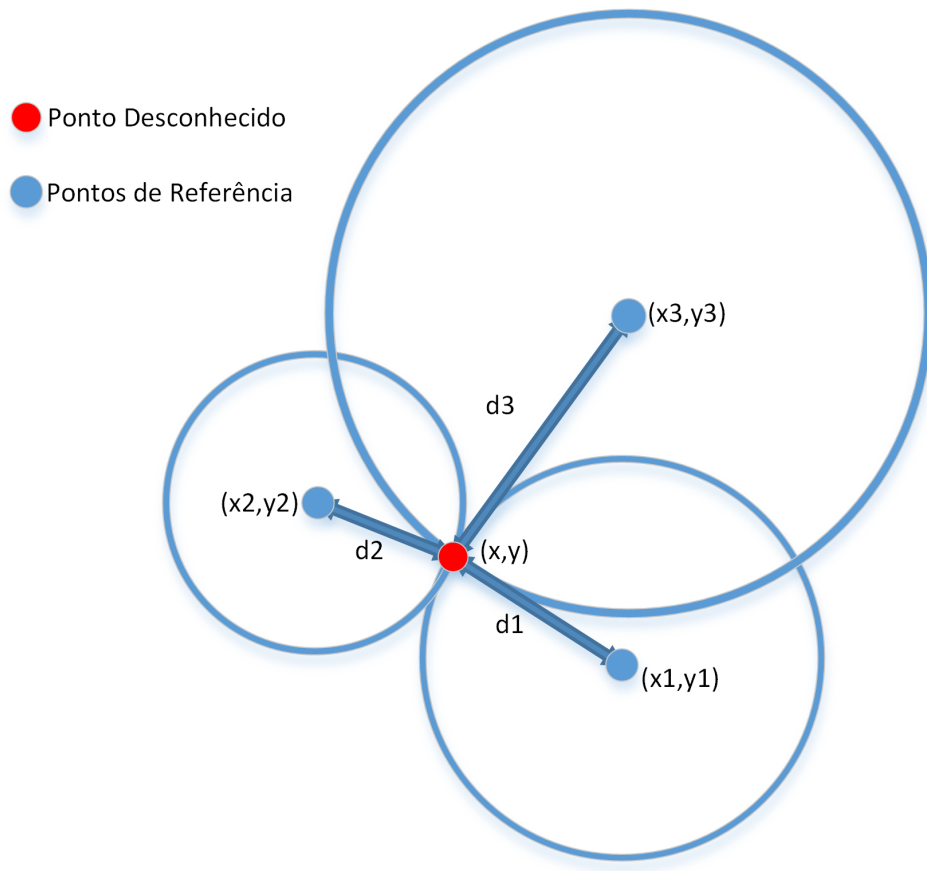


Figura 2.3: Trilateração

Os termos de 2º grau anulam-se e por isso o sistema fica linear, sendo transformado na equação matricial 2.10:

$$AX = B \quad (2.10)$$

onde

$$A = \begin{bmatrix} -2x_1 + 2x_2 & -2y_1 + 2y_2 \\ -2x_1 + 2x_3 & -2y_1 + 2y_3 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} d_1^2 - d_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2 \\ d_1^2 - d_3^2 - x_1^2 + x_3^2 - y_1^2 + y_3^2 \end{bmatrix}$$

e pode ser resolvido através da equação pseudo inversa de Moore–Penrose 2.11:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T * B \quad (2.11)$$

A equação 2.11 é útil se houver informação redundante ou erros na determinação das distâncias ou das coordenadas dos pontos fixos, contudo pode ser simplificada na equação 2.12 se A^{-1} for quadrada.

$$X = A^{-1} B \quad (2.12)$$

No caso de um sistema de posicionamento, aquilo que será medido serão as distâncias aos pontos de referência. Tendo em conta que as distâncias medidas para calcular a posição estão sujeitas a erro de medição, esse erro vai se propagar na matriz solução X da seguinte forma:

$$A(X + \delta x) = B + \delta B \quad (2.13)$$

$$AX + A\delta x = B + \delta B \quad (2.14)$$

Em que AX corta com B devido à equação 2.10.

$$A\delta x = \delta B \quad (2.15)$$

$$\delta x = A^{-1} \delta B \quad (2.16)$$

$$\| \delta x \| = \| A^{-1} \delta B \| \leq \| A^{-1} \| \| \delta B \| \quad (2.17)$$

A matriz A não tem erro associado pois é composta por valores conhecidos e δB corresponde à variação da matriz B causada pelas distâncias medidas.

$$\delta B = \left| \frac{\sqrt{(2d_1)^2(\delta d_1)^2 - (2d_2)^2(\delta d_2)^2}}{\sqrt{(2d_1)^2(\delta d_1)^2 - (2d_3)^2(\delta d_3)^2}} \right|$$

δd_i representa o erro da medição das distâncias d_i para $i = 1, 2$ e 3 .

Sistemas Hiperbólicos

Sistemas hiperbólicos são um método de localização que usa a diferença da distância de pontos de referência conhecidos para calcular a posição.

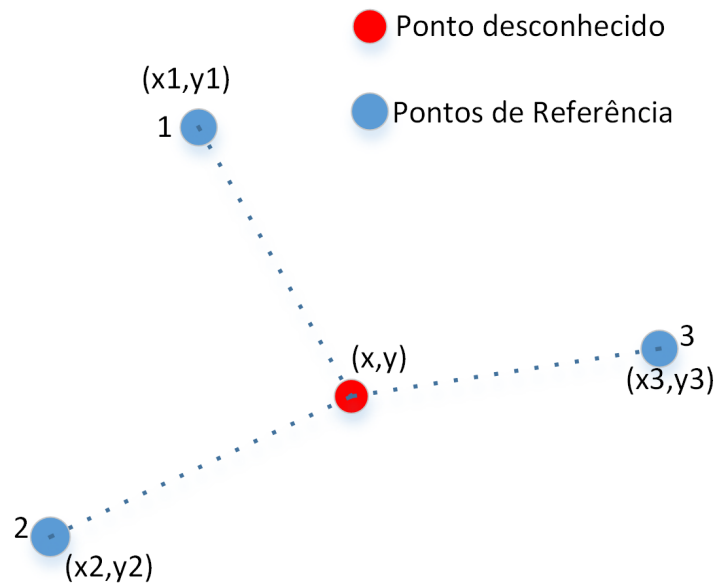


Figura 2.4: Sistemas Hiperbólicos

Um método usa a diferença do tempo de chegada (TDOA) de sinais vindos de vários pontos de referência para calcular a diferença da distância entre pontos de referência e o ponto desconhecido. Cada sinal tem um padrão diferente para poder ser distinguido dos outros. Usando essa diferença entre os tempos de chegada, é possível calcular a diferença das distância entre pontos de referência, como nas equações 2.18 e 2.19.

$$d_{12} = c(T_2 - T_1) \quad (2.18)$$

$$d_{32} = c(T_3 - T_1) \quad (2.19)$$

c representa a velocidade da onda usada, T_1 , T_2 e T_3 representam o tempo de chegada das ondas dos pontos de referência e d_{12} e d_{32} representam a diferença das distância entre os pontos de referência e o ponto desconhecido. O resultado de localizações possíveis que cumprem a condição desta diferença de tempo resulta numa curva hiperbólica. Usando o mesmo método com vários pares de pontos de referência obtêm-se mais curvas hiperbólicas que se intersectam e assim é calculada a posição do ponto desconhecido. Este método era utilizado pelo LORAN-C e ainda é usado em técnicas de localização com a rede de telefone [3].

Outro tipo de sistema hiperbólico é o sistema de localização Decca referido anteriormente, este sistema usava as diferenças de fase das ondas recebidas para estimar a diferença das distâncias aos vários pontos de referência através das seguintes equações:

$$d_{12} = \frac{\lambda(\Theta_2 - \Theta_1)}{2\pi} \quad (2.20)$$

$$d_{13} = \frac{\lambda(\Theta_3 - \Theta_1)}{2\pi} \quad (2.21)$$

A partir do momento em que se sabe estas diferenças entre distâncias e a posição dos pontos de referência, é possível calcular a posição do recetor com as seguintes equações:

$$d_{12} = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} - \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} \quad (2.22)$$

$$d_{32} = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} \quad (2.23)$$

Quanto mais vezes se aplicar o método com diferentes pares de pontos de referência mais preciso é o sistema.

2.2 Sistemas de Posicionamento em Ambientes Interiores

Sistemas de Posicionamento em Ambientes interiores são, como o nome indica, sistemas de posicionamento que funcionam no interior de edifícios. Muitas companhias já começaram a desenvolver sistemas de posicionamento em ambientes interiores e até já há soluções disponíveis ao utilizador comum, como é o caso de sistemas desenvolvidos pela Google e outras grandes empresas como irá ser demonstrado mais à frente. A localização precisa em interiores abre um mundo de possibilidades, para vários tipos de utilizadores será vantajoso saber informações em tempo real dentro de edifícios, como por exemplo:

- Centros Comerciais - ser guiado até uma loja, saber o caminho para encontrar um produto específico e receber notificações de promoções perto do utilizador. Para o dono da loja é possível fazer uma análise de como os seus clientes se comportam na loja para melhorar o seu funcionamento.
- Museus - ser guiado e receber informação acerca de cada parte do museu de acordo com a posição do utilizador.
- Universidades/Empresas - saber o caminho para um departamento ou para um escritório.
- Hospitais - saber o caminho pelo hospital e manter o controlo de pacientes e de equipamento médico.
- Fábricas - manter o controlo de produtos.
- Aeroportos - saber o caminho para a porta do voo e receber informação do mesmo.
- Estádios/Concertos - Saber o caminho para o lugar ou instalações.
- Instalações subterrâneas - Locais de trabalho como minas podem usufruir deste tipo de sistemas.

Outra grande vantagem da localização em ambientes interiores são os benefícios que traz aos deficientes visuais que poderão conseguir orientar-se dentro de edifícios, mesmo que nunca tenham lá estado antes.

Em 2012 foi criada a "In-Location Alliance" e era constituída por 22 companhias como a Broadcom, a Nokia, a Qualcomm, a Samsung Electronics e a Sony Mobile Communications. A aliança é aberta a qualquer empresa que se comprometa a investigar este tipo de sistemas e atualmente também participam empresas como a Cisco, a Intel, a Microsoft, a Philips, a Huawei, a LG electronics, a Motorola, entre outras. O objetivo deste conglomerado de empresas é criar soluções de sistemas de posicionamento em ambientes interiores com alta precisão, baixo consumo, mobilidade, fácil implementação e uso intuitivo para dispositivos móveis. [4]

2.2.1 Sistemas Comerciais existentes

Várias companhias tem apostado em criar sistemas de localização em ambientes interiores e há vários métodos já implementados com diferentes tecnologias, como por exemplo:

Rádio Frequência

Como é possível ver na figura 2.5, a Google já tem implementado no Google Maps o mapa interior de alguns edifícios tais como aeroportos e centros comerciais e marca a posição atual da pessoa. A Google usa no GoogleMaps um sistema onde a localização é efetuada através da potência de sinais Wi-Fi para estimar a distância aos pontos de acesso Wi-Fi e da posição conhecida de cada *HotSpot* Wi-Fi que servem como referência para triangular a posição de um *smartphone* com a aplicação. Para usar esta técnica é preciso ter um mapa com a posição dos routers do edifício. Outras companhias que usam este método de localização são a Microsoft, a Accuware, a Skyhook ou a Wifarer.

A Apple está a desenvolver uma aplicação para iphone chamada "*Indoor Survey App*", esta aplicação mede ondas RF provenientes de routers Wi-Fi. Esta aplicação conta com a ajuda dos utilizadores para mapear o edifício. Quando o utilizador indica a sua posição

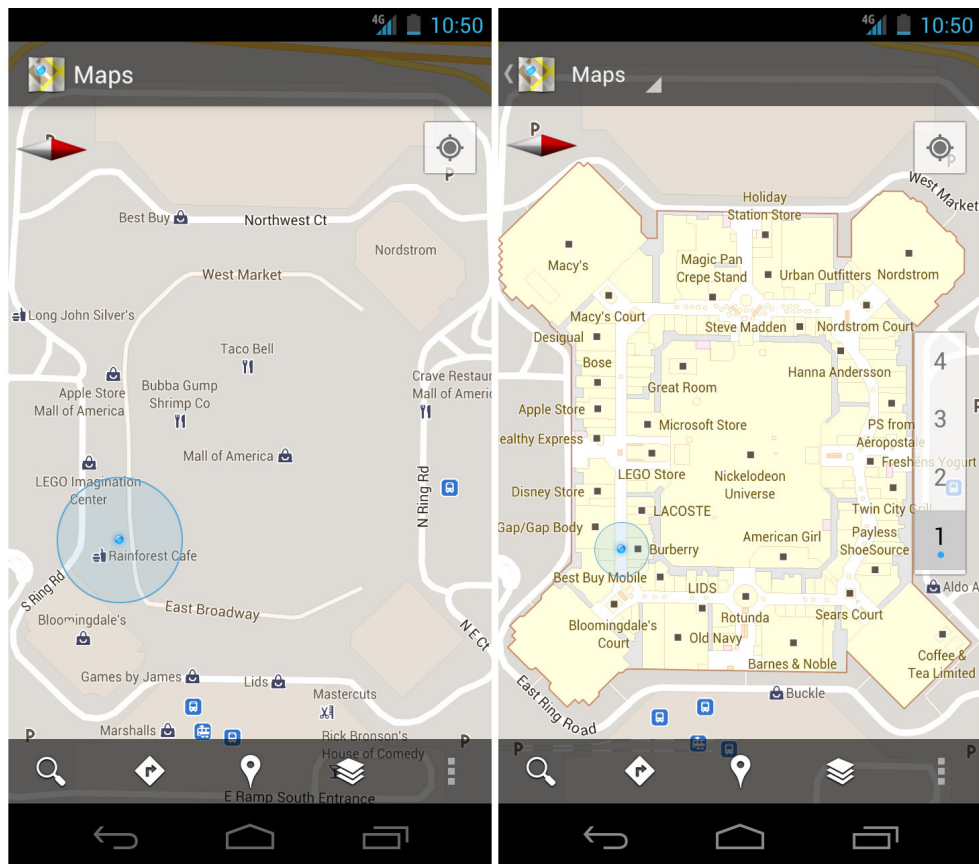


Figura 2.5: Imagem Google Maps de um centro comercial com GPS(esquerda)e com IPS(Direita) [5].

clicando no mapa, a aplicação mede as ondas Wi-Fi criando uma "impressão digital" que associa à posição no mapa. Quantas mais vezes o utilizador registar impressões das ondas RF mais preciso será o sistema. Depois de calcular a posição, a aplicação faz ainda uso dos sensores do iPhone para auxiliar o rastreio.[6] O uso de sensores para auxiliar o sistema é conhecido por fusão de sensores e irá ser abordado mais à frente.

A Locata é uma empresa australiana que desenvolveu um sistema com um funcionamento semelhante ao GPS mas em vez de usar satélites usa transmissores próprios que desenvolveram para criar uma rede com ondas rádio. Estes transmissores servem como pontos de referência para triangular a posição. Este sistema foi desenvolvido para ambientes interiores mas também para grandes zonas urbanas onde o GPS apresenta algumas

falhas [7].

Bluetooth

A Nokia usa tecnologia *bluetooth* conseguindo assim uma maior resolução da posição, contudo obriga à instalação de vários faróis *bluetooth* específicos. [8] A Apple desenvolveu uns transmissores com tecnologia BLE chamados iBeacons que servem como pontos de referência para localização [9]. O princípio de funcionamento é o mesmo que num sistema Wi-Fi, os faróis *bluetooth* servem como pontos de referência para triangular a posição e a distância aos pontos de referência é estimada através da força do sinal *bluetooth*.

Impressões Magnéticas

A IndoorAtlas é uma companhia finlandesa que mapeia um edifício e regista impressões magnéticas. Depois a bússola digital interna de um *smartphone* consegue detetar o campo magnético e envia a sua impressão para um servidor que compara com as impressões do mapa magnético do edifício e consegue assim saber a posição do utilizador. É um princípio de funcionamento muito semelhante ao projeto da Apple referido anteriormente [10].

Fusão de Sensores

A Broadcom desenvolveu um chip para *smartphones* (BCM4752) que consegue calcular a posição com recurso a GPS, Wi-Fi, *Bluetooth*, NFC e os sensores internos do *smartphone*. Este sistema tem vantagem em relação aos outros visto que não utiliza só uma tecnologia para calcular a posição. Se o recetor for um *smartphone*, praticamente todos os sistemas de localização em ambientes interiores usam os vários sensores disponíveis no aparelho para melhorar a precisão do sistema [11].

Apesar de já haver uma grande aposta em sistemas de posicionamento interiores, como foi demonstrado, um dos recentes e vantajosos avanços neste tipo de sistemas tem sido a comunicação por luz visível.

2.3 Comunicação por Luz Visível

2.3.1 História

A comunicação com o uso de luz visível é dos tipos de comunicação mais antigos, desde as civilizações mais antigas como os gregos, romanos e chineses que usaram espelhos, metais polidos e fogo para emitir sinais de luz, até aos índios americanos que usaram fumo e ainda mais tarde no séc. XIX o exército americano usava espelhos para refletir a luz do sol em código Morse. Contudo, o primeiro engenho que realmente foi criado para comunicar através de luz visível foi o fotofone criado por Alexander Graham Bell em 1880.

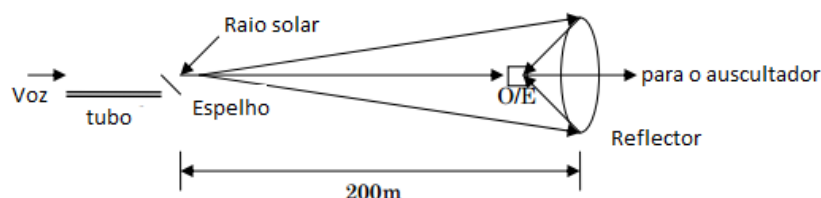


Figura 2.6: Princípio de funcionamento do Photophone.

Este aparelho, como se pode ver na figura 2.6, transmitia o sinal refletindo a luz do sol num espelho que estava em vibração produzida pela voz e tinha um alcance de 200 metros. O fotofone além de ser o primeiro aparelho a usar luz visível, também foi o primeiro aparelho a conseguir comunicar sem fios e foi criado apenas 3 anos depois de Bell ter criado o telefone.

A partir daí verificou-se uma maior aposta no uso de ondas rádio, a partir de 1960 começou a haver também um maior uso das comunicações ópticas devido à invenção do laser e mais tarde das fibras e amplificadores ópticos.

O baixo interesse em explorar a comunicação por luz visível deveu-se a vários fatores, um dos principais foi o grande potencial que as tecnologias por cabo e rádio frequência tinham na altura e daí terem sido mais exploradas. Outro grande fator foi a eficiência que um sistema por luz visível tinha, as tecnologias de lâmpadas existentes não eram as mais propícias para comunicação devido a fatores como:

- Pouca eficiência energética;
- Pouca durabilidade;
- Pouco resistentes a fatores externos como temperatura e humidade;
- Baixa velocidade de comunicação;
- Inércia térmica;

Apesar de a comunicação por luz visível não ter sido muito explorada durante esses anos, houve algumas companhias que apostaram nesta tecnologia, por exemplo em 1955 foi criado o primeiro comando de televisão sem fios que usava sinais de luzes para 4 foto recetores nos 4 cantos da televisão, o "*Flashmatic*" criado por Eugene Polley da Zenith Radio Corporation e permitia mudar canais e volume. Contudo por vezes a interferência solar fazia mudar o canal ou o volume do som da televisão sem que o comando fosse pressionado. Outra companhia que apostou nesta tecnologia foi a *Nintendo* em 1971 com o "*Light Telephone*", um brinquedo que tem o mesmo princípio que um *Walkie-Talkie* mas em vez de usar ondas rádio para transmitir o sinal, usava uma lâmpada incandescente normal e para receber o sinal uma célula fotovoltaica, tinha um alcance de 10 a 30 metros [12].

Só em anos mais recentes é que a comunicação por luz visível voltou a ser alvo de vários projetos de investigação e isto deve-se ao avanço da tecnologia LED.

Em 1907 Henry Joseph Round descobre que materiais inorgânicos emitem luz quando lhes é aplicada corrente elétrica, publicou um artigo sobre o efeito mas decidiu não explorar mais esse fenómeno. Só 14 anos mais tarde, em 1921, Oleg Losev observa o mesmo efeito e estudou-o, sendo por isso considerado o inventor do LED. Em 1935 George Destriau descobre a emissão de luz no sulfureto de zinco, chama-lhe "efeito de Losev" e é considerado o inventor da eletroluminescência.

Em 1962 o primeiro LED vermelho é vendido comercialmente nos Estados Unidos da América. Os primeiros LEDs eram vermelhos e ainda muito ineficientes, por cada 1000

elétrons recombinados apenas 1 fóton vermelho era gerado, o que corresponde a menos de 1/10 da luz gerada por uma lâmpada incandescente. Nos anos seguintes com o avanço da tecnologia e uso de diferentes tipos de semicondutores foi possível criar LEDs muito mais eficientes, em 1999 já existiam LEDs em que 55% dos elétrons geravam fótons, e também começaram a aparecer LEDs com diferentes comprimentos de onda e por isso geram luz com cores diferentes.

2.3.2 Tecnologia LED

LED é um díodo semicondutor que usa energia elétrica para produzir energia luminosa quando diretamente polarizado. É composto por 2 materiais que formam uma junção PN, o material do tipo N contém cargas negativas, elétrons, e o material do tipo P contém lacunas cuja deslocação tem um efeito semelhante ao deslocamento de uma carga positiva. Ao ser aplicada uma tensão aos seus terminais, os elétrons passam do material do tipo N para o material do tipo P e as lacunas fazem o caminho inverso. Quando os elétrons e as lacunas se encontram na região ativa entre os 2 materiais existe recombinação, o que produz fótons na região do infravermelho ou da luz visível. Este fenômeno é conhecido por eletroluminescência. Quanto maior a tensão aplicada nos terminais do LED, mais energia é libertada.

Os materiais mais comuns das junções PN que compõem um LED são o Gálio(Ga), o Arsênio(As), o Fósforo(P), o Índio(In) e o Alumínio(Al). Outros materiais semicondutores como o Silício(Si) e o Germânio(Ge) não são tão usados porque a maior parte da energia libertada por estes é na forma de calor, o que os torna muito pouco eficientes. Dependendo do semicondutor usado e da sua composição química é possível obter emissão de luz com diferentes comprimentos de onda e por isso com cores diferentes, hoje em dia existem LEDs com praticamente todas as cores do espectro de luz visível como é mostrado na figura 2.7.

Atualmente o tipo mais comum de iluminação, além dos LEDs, são as lâmpadas incandescentes e as CFL. As lâmpadas incandescentes são feitas com um filamento de tungstênio que quando percorrido por corrente elétrica aquece e faz o metal brilhar produzindo luz.

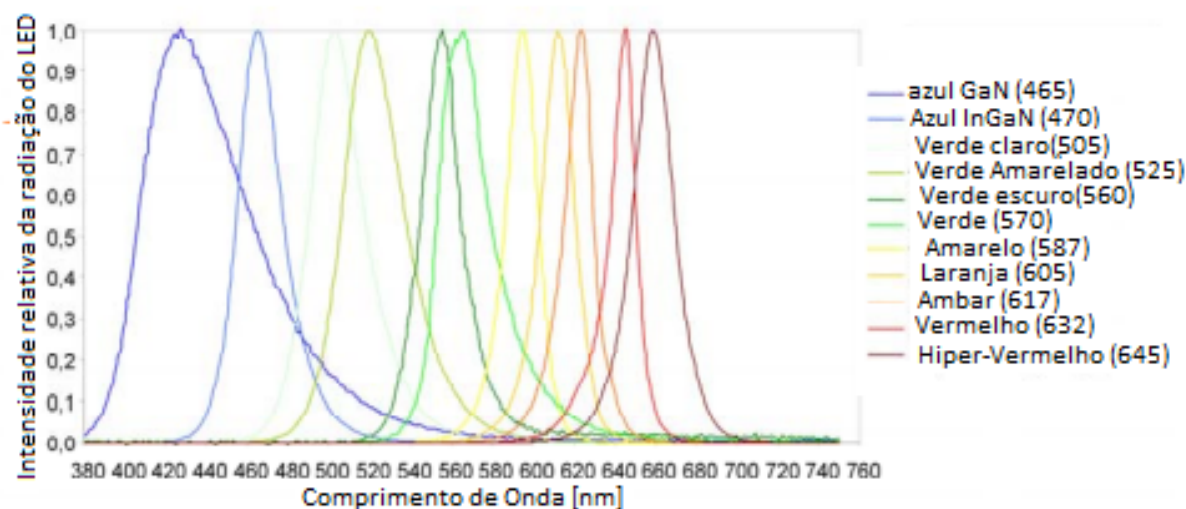


Figura 2.7: Variação da intensidade do LED com diferentes comprimentos de onda e materiais.[13]

As CFL são feitas com mercúrio que é vaporizado quando se aplica uma corrente elétrica. O gás ao ser excitado produz radiação ultravioleta que ao passar por fósforo altera o seu comprimento de onda e produz luz branca.

As lâmpadas com tecnologia LED apresentam muitas vantagens em relação a outras lâmpadas:

- Tempo de vida - Um LED pode chegar até às 50,000 horas de vida, enquanto que uma lâmpada incandescente apenas consegue no máximo 2,000 horas e uma lâmpada fluorescente 10,000 horas.
- Durabilidade - As Lâmpadas LED são muito mais resistentes a fatores externos como temperatura e humidade.
- Eficiência - O LED funciona sem dissipar muita energia por calor, e por isso torna-se muito mais eficiente que outras lâmpadas. Por exemplo, uma lâmpada incandescente têm uma eficiência de cerca de 9% e um LED consegue ter de 40%.
- Luz emitida - A luz de um LED consegue ter o mesmo brilho, intensidade e cor que outras lâmpadas e é de muito mais fácil a manipulação para obter diferentes

características. Outra vantagem é que a luz de um LED não tem radiação Ultra violeta, o que a torna vantajosa para iluminar pinturas e outros artefactos sem os estragar.

- Comutação Rápida - A maioria das lâmpadas demora um certo tempo a ligarem. Com os LEDs não existem este problema visto que os LEDs ligam-se ao máximo instantaneamente. Esta característica também permite que seja possível a comunicação com sinal emitido por LEDs através da sua comutação.
- Manutenção - Visto que os LEDs são mais resistentes e duram mais tempo, os custos de manutenção serão muito mais baixos que outras tecnologias de iluminação.
- Modulação - LEDs são o único sistema de iluminação que conseguem ser rapidamente modulados ligando e desligando emitindo um sinal que não é perceptível ao olho humano mas pode enviar informação para um foto recetor. É esta vantagem que faz com que o LED seja ideal para comunicação por luz visível.

A tecnologia LED evoluiu muito rapidamente e prevê-se que continue a evoluir, como se vê na figura 2.8 [14]. Roland Haitz previu que o brilho de um LED aumentará por um fator de 20 a cada 10 anos e que o custo por lúmen iria diminuir por um fator de 10 nos mesmos 10 anos. Esta previsão revelou-se correta, nas poucas décadas de existência do LED contudo nos últimos desde o surgimento de LEDs brancos de alta potência, esta lei foi ultrapassada. Desde 1998 até 2007, a intensidade luminosa de LEDs brancos tem aumentando com um fator de 30 [14].

Com a evolução desta tecnologia e as suas óbvias vantagens como eficiência, cor, custo e durabilidade os LEDs têm sido cada vez mais usados em muitas aplicações nos mais diversos campos, como por exemplo, navegação, robótica, iluminação, instrumentação, aplicações militares, etc... Do mesmo modo que se prevê o avanço da tecnologia LED, prevê-se também que a procura desta tecnologia será cada vez maior e mais aplicações começarão a apostar nos LEDs.

Uma das aplicações que a tecnologia LED que tem vindo a crescer nos últimos anos são

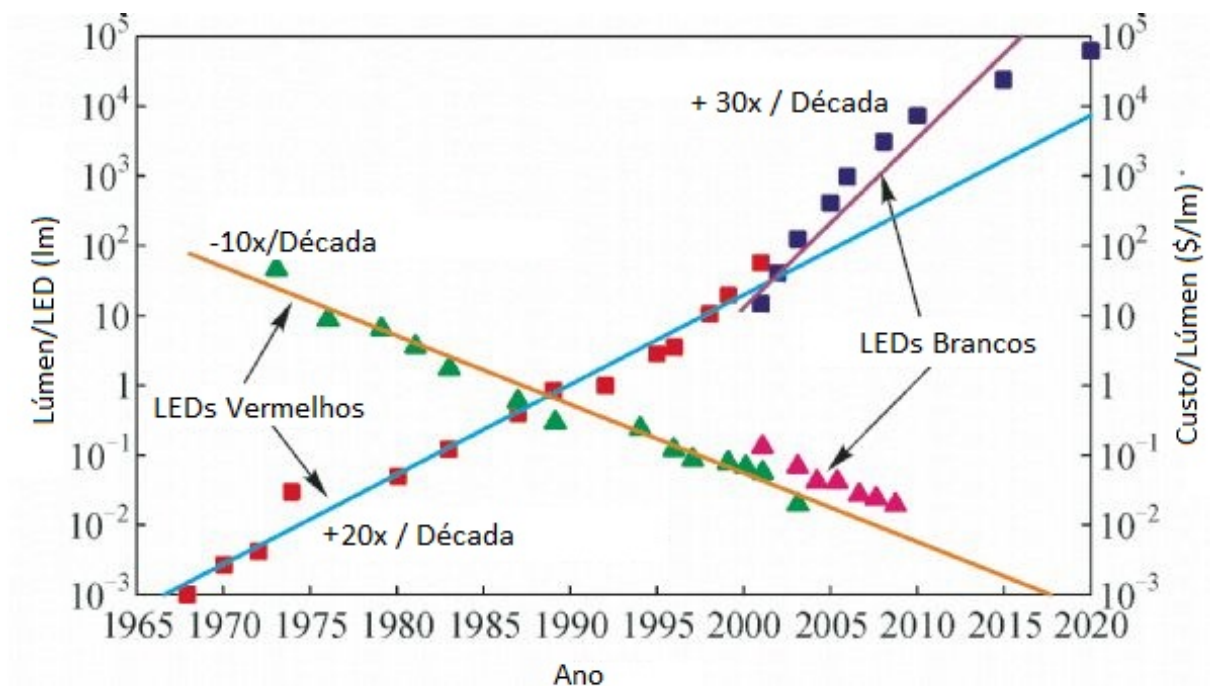


Figura 2.8:

Lei de Haitz (linhas laranja e azul) e perspectivas de brilho por LED (linha roxa).

Quadrado vermelho: brilho LED vermelho; Triângulo verde: custo LED vermelho;

Quadrado azul: brilho LED branco; Triângulo rosa: custo LED branco)

os sistemas de comunicação por luz visível. Devido à propriedade de rápida comutação que esta tecnologia oferece, é possível comutar o LED, ligando e desligando-o a uma frequência superior à que a do olho humano consegue ver e enviando sinal para depois ser recebido e processado por um recetor. Assim, é possível ter uma área iluminada e ao mesmo tempo haver comunicação de dados onde houver luz. Um sistema VLC é caracterizado por um emissor luminoso que consiga comutar rapidamente, como é o caso dos LEDs, e um recetor que consiga captar as variações de luz enviadas pelo emissor. Sistemas VLC podem ter os mais diversos objetivos, desde posicionamento, como é descrito nesta dissertação, até ao acesso à Internet.

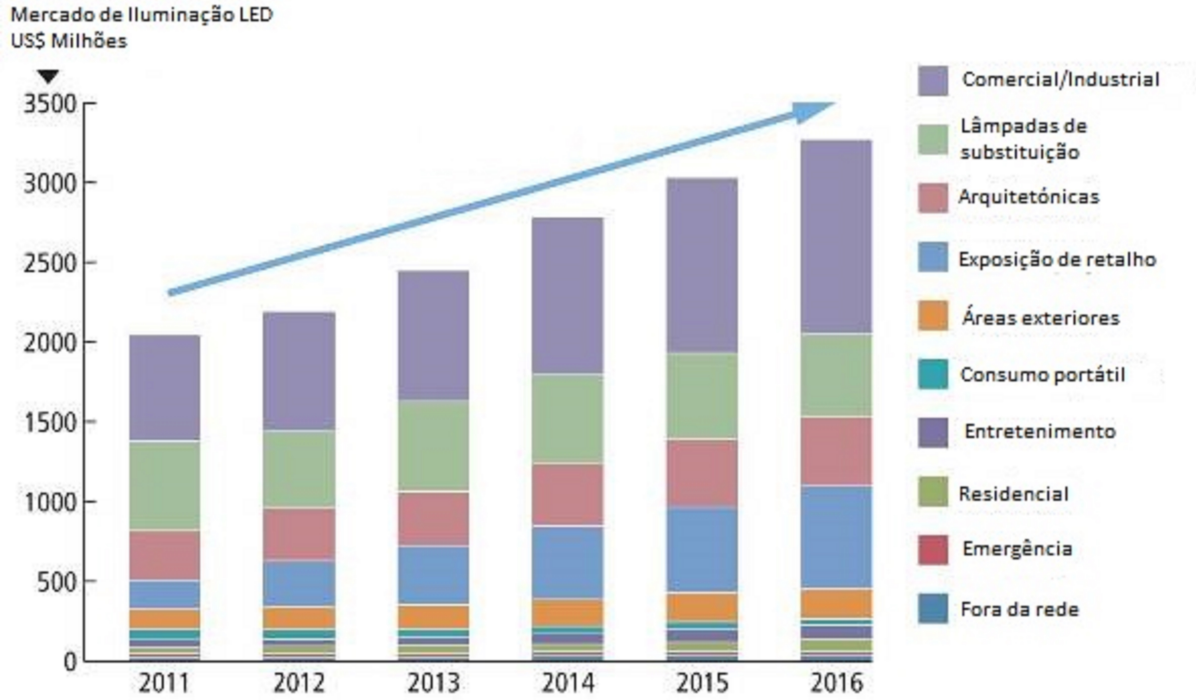


Figura 2.9: Crescimento do mercado LED em diversas áreas nos últimos anos

Os LEDs são caracterizados por vários fatores desde as suas características físicas até às suas características elétricas. Um dos aspetos mais importantes de um LED é o *Half Power Angle* (HPA) que nos permite saber o ângulo de visão do LED quando está com metade da sua intensidade luminosa total. Este aspeto é muito importante para um sistema VLC pois é necessário saber qual o ângulo de visão de cada luminária para projetar o sistema.

O diagrama de radiação emitido por um LED tem uma distribuição lambertiana que segue o modelo representado na equação 2.24. [15]

$$I(\theta) = I_0 \cos(\theta)^n, |\theta| \leq \frac{\pi}{2} \quad (2.24)$$

I_0 representa a intensidade de radiação máxima para quando $\theta = 0$, ou seja, diretamente alinhado com o emissor, e n é uma variável que expressa a diretividade do emissor e depende diretamente do HPA do emissor pela equação 2.25]

$$n = \frac{-\ln(2)}{\ln(\cos(HPA))} \quad (2.25)$$

A potência recebida no recetor depende da potência emitida P_t , do HPA do emissor e também da distância que os separa d segundo a equação 2.26.

$$P_r = \frac{P_t(n+1) \cos(\theta)^n}{2\pi d^2} \quad (2.26)$$

Em que P_t representa a potência total do transmissor.

É importante relacionar esta distribuição lambertiana com o HPA pois um LED com um HPA muito confinado não abrangerá tanta área para estabelecer comunicação mas terá maior potência em toda a sua área de iluminação e um LED com um HPA maior, apesar de iluminar uma maior área, não terá tanta potência em toda a sua área de iluminação.

Assim a comunicação por luz visível ganha novo impulso. O VLC tem sido alvo de estudo de muitos investigadores e companhias. Mais tarde neste capítulo serão apresentados vários sistemas de posicionamento indoor que usam comunicação por luz visível. O VLC contextualiza-se no *Optical Wireless Communication* (OWC), que inclui todas as comunicações óticas sem uso de cabos ou fios como as UV e as IR. Além disso também se inclui no FSO, que é a tecnologia de comunicação óptica que usa propagação de luz em espaço aberto para transmitir dados.

2.4 Sistemas de posicionamento em ambientes interiores por luz visível

Sistemas de posicionamento em ambientes interiores por luz visível necessitam de uma lâmpada a emitir um sinal característico e de um recetor para receber esse sinal. Nesta

secção irão ser descritos alguns sistemas de posicionamento em ambientes interiores através de VLC, tanto científicos como comerciais.

2.4.1 Estudos científicos

Este tipo de sistemas tem sido uma grande aposta de investigação pela comunidade científica. De seguida serão apresentados e descritos alguns artigos desenvolvidos pela comunidade científica nos últimos anos. Em 2008 Masaki Yoshino, Shinichiro Haruyama e Masao Nakagawa publicaram um artigo chamado *High-accuracy Positioning System using Visible LED Lights and Image Sensor* onde propunham um sistema com o objetivo de localizar um recetor usando comunicação por luz visível. Para isso foram implementados LEDs em 3 pontos conhecidos, e cada ponto envia dados com a sua posição em 3 dimensões. O recetor usado é um sensor de imagem que recebe os 3 sinais separados espacialmente. As posições recebidas no sensor de imagem e as posições conhecidas dos emissores são depois processadas para calcular a posição através de equações trigonométricas. Os testes foram feitos em simulação, assumiu-se um sensor de imagem standard com um FOV de 45º graus. Foram feitos testes variando a resolução do sensor de imagem e variando também a posição do recetor ao longo dos 3 eixos. Foi concluído que o sistema funciona melhor quando o sensor de imagem tem uma resolução de 1000*1000 pixéis, sendo que conseguem determinar a posição do recetor com um erro de 1.5metros [16].

Em setembro de 2010, Swook Hann, Jung-Hun Kim, Soo-Yong Jung e Chang-Soo Park escreveram um artigo chamado *White LED Ceiling Lights Positioning Systems for Optical Wireless Indoor Applications* em que propunham um sistema que usa LEDs de iluminação num espaço interior que são usados para calcular a posição de um objeto usando um método de correlação. Cada emissor LED emite um endereço de 4 bits diferentes para o distinguir dos outros e para dar informação ao recetor. Os 2 bits mais significativos representam o eixo do x e os 2 bits menos significativos representam o eixo do y. Através da potência recebida de cada emissor LED os autores do artigo conseguiram desenvolver 2 fatores de correlação que determinam a posição no eixo do x e no eixo do y. Foram

realizados testes experimentais numa área de 30x30cm com os emissores LED a 50cm de altura. Os emissores tinham um HPA de 55º e o recetor um FOV de 25º. Verificou-se que os fatores de correlação desenvolvidos são muito semelhantes aos resultados obtidos na prática. Este sistema tem um erro máximo de 1.495cm e um erro médio de 0.651cm [17].

Em Dezembro 2011, Mohammad Shaifur Rahman, Md. Mejbaul Haque e Ki-Doo Kim escreveram um artigo chamado *Indoor Positioning by LED Visible Light Communication and Image Sensors* em que é proposto um sistema que usa um array de LEDs no teto de um espaço interior e em que 4 desses LEDs transmitem um sinal com as suas coordenadas tridimensionais a ser recebido por 2 sensores de imagem perto da posição desconhecida. A posição é então calculada através das relações geométricas das imagens dos sensores. Neste artigo é descrito o algoritmo usado para calcular a posição desconhecida e são apresentados resultados de uma simulação deste sistema. Os testes foram simulados num espaço interior com 3.5m de altura, altura esta onde se encontra o array de LEDs. Os 2 sensores de imagem situam-se a 10cm de distância um do outro. Foram realizadas 32761 estimativas de posição numa área de 1.8x1.8 m². O erro máximo obtido foi cerca de 0.8 metros [18].

Em 2013 Madoka Nakajima e Shinichiro Haruyama, num artigo chamado *New indoor navigation system for visually impaired people using visible light communication* propõem um sistema para ajudar pessoas com deficiências visuais a guiarem-se no interior de edifícios. É um sistema que usa luzes de iluminação LED presentes num edifício para comunicar com um recetor através do sensor de luz integrado neste. Cada LED emite um número de identificação por luz visível que é reconhecido pelo recetor, o recetor comunica a um smartphone por Bluetooth este mesmo número de identificação e então o smartphone calcula a posição através de Wi-Fi. Depois de conhecida a posição, o caminho é indicado ao utilizador através de headphones ligados ao smartphone. A bússola do smartphone é usada para saber a direcção em que o utilizador se encontra. Foram feitos testes reais a este sistema com os LEDs no teto, a 2,70m de altura, e com pessoas de visibilidade reduzida/nula, todas as pessoas chegaram ao destino. O principal erro foi originado pela bússola do smartphone [19].

Em Outubro de 2013, Mauro Biagi, Anna Maria Vegni e Thomas D.C. Little publicaram

um artigo chamado *LAT indoor MIMO – VLC – Localize, Access and Transmit* onde propuseram um sistema que localiza, acessa e transmite, apenas irá ser abordado aqui a parte de localização. A localização é feita através da medição da potência de vários LEDs, estas medições são comparadas com outras medições previamente feitas que se encontram numa base de dados para determinar a localização do recetor. Quantos mais LEDs forem medidos menor a ambiguidade do sistema, sendo que são necessários pelo menos 3 LEDs para reduzir a ambiguidade. Foram realizados testes em simulação de maneira a verificar quantos LEDs são necessários numa divisão de 10x9x3m para ter um BER igual a 10^{-5} e a 10^{-7} . Foi concluído que são necessários 4 LEDs nas zonas mais críticas para o bom funcionamento do sistema. Os teste foram realizados tendo em conta as características da sala como reflexões das paredes, secretárias, cadeiras e outros materiais [20].

O posicionamento em espaços interiores com recurso a VLC continua a ser um alvo de investigação. O uso de LEDs permite criar diferentes métodos de localização, como foram aqui referidos.

2.4.2 Sistemas Comerciais

Também as grandes empresas de iluminação têm aproveitado a tecnologia LED para desenvolver sistemas de posicionamento indoor [21]. A Acuity Brands comprou uma empresa chamada ByteLight que desenvolveu um sistema de LEDs que enviam padrões de sinais. A câmara de um smartphone recebe o sinal dos LEDs e depois o software da Bytelight processa esses padrões associando-os a cada LED cujas posições são previamente conhecidas e estima a distância através da potência recebida. Assim é possível triangular a posição [22]. Atualmente a Acuity Brands tem este serviço disponível para estabelecimentos comerciais que queiram usar este sistema para melhorar a experiência dos seus clientes. Outra empresa de iluminação que apostou nos serviços de localização indoor e tem um sistema muito semelhante ao da Acuity Brands é a GEligthing [23].

2.4.3 Comparação entre VLC, Wi-Fi e Bluetooth

Sistemas de posicionamento em ambientes interiores como o VLC apresentam vantagens e desvantagens em relação a sistemas com tecnologias como o Wi-Fi ou o Bluetooth:

- Precisão - Sistemas baseados em VLC como o da Acuity Brands consegue ter um erro entre 0.01m a 0.03m ao contrário de sistemas por Bluetooth quem têm um erro entre 2m a 20m e de sistemas por Wi-Fi que têm um erro entre 10m a 100m. [21]
- Direção - VLC é a única tecnologia até ao momento que tem capacidade para calcular a direção do utilizador em espaços interiores [21].
- Existência - Estes sistemas já existem implementados em alguns centros comerciais. Contudo a existência de sistemas baseados em Bluetooth e Wi-Fi é muito mais comum por serem soluções que foram exploradas primeiro.
- Alinhamento - Se o recetor for por exemplo um smartphone, sistemas baseados em VLC apresentam a clara desvantagem de não funcionarem se o recetor estiver fora de linha de vista. Sistemas como o da Acuity Brands recorrem a uma rede Bluetooth para colmatar esta falha.
- Recursos - As infraestruturas necessárias para sistemas baseados em VLC já existem praticamente em todo o lado com o propósito de iluminação e prevê-se que os LEDs continuem a ser a aposta para o futuro nesta área, sendo por isso necessário apenas adaptar estas infraestruturas a terem funções de comunicação. Sistemas baseados em Bluetooth e Wi-Fi necessitam da instalação de pontos de acesso específicos e, no caso apenas de Wi-Fi, ocupa largura de banda considerável.

Este capítulo explicou o que são sistemas de posicionamento em ambientes interiores e o porque de serem necessários nos dias de hoje e também demonstrou que a comunicação por luz visível é uma forte alternativa a sistemas existentes de localização em ambientes interiores pois tem vantagens em relação às outras tecnologias existentes.

Capítulo 3

Modelo Matlab

Neste capítulo é descrito o trabalho realizado no software Matlab, desde simulações como uma fonte de Luz com distribuição lambertiana, a potência de um sinal ótico recebido num sensor [1] até à simulação do cálculo de posição através do uso desse mesmo sensor para diferentes distribuições de emissores.

3.1 Introdução

Como foi referido anteriormente, o trabalho desta dissertação de mestrado é feito num projeto em conjunto e por isso é necessário descrever o sensor a ser simulado [1].

Também foi referido no capítulo 1, e é possível ver na figura 3.1, que o sensor é composto por vários fotodíodos com ângulos de elevação distintos de maneira a conseguir discriminar o ângulo com que o sinal de luz visível chega ao sensor. Esta discriminação é feita através de uma média pesada usando os ângulos dos fotodíodos e a potência recebida em cada um deles.

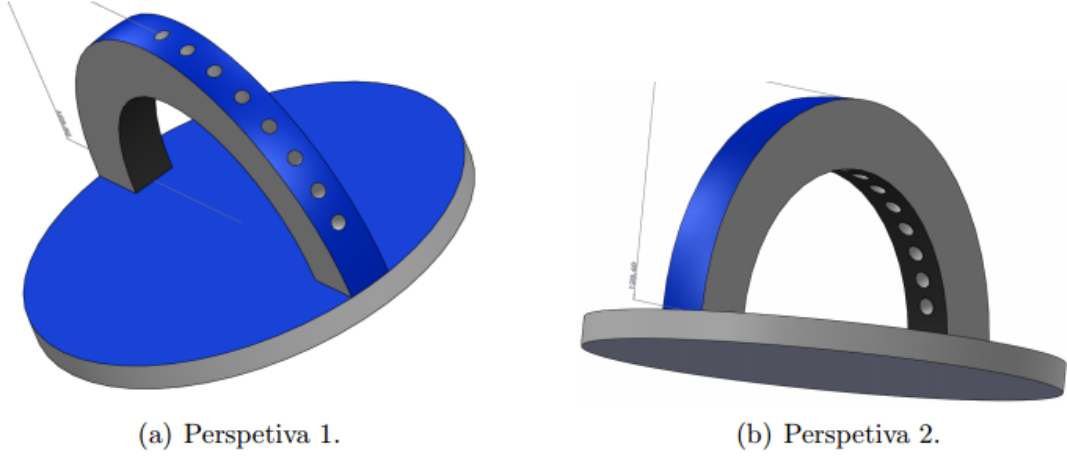


Figura 3.1: Protótipo do recetor.

A distribuição dos fotodíodos ótima é a que se encontra na tabela 3.1 com um FOV de 7.5° [1].

Tabela 3.1: Foto-díodos

Foto-díodo	1	2	3	4	5	6	7	8
Ângulo $[\circ]$	90.00	79.10	68.35	57.79	47.45	37.38	26.65	18.41

Onde o ângulo é discriminado pela média pesada da fórmula 3.1.

$$\theta = \frac{\sum_{n=1}^N (\alpha_n * P_n)}{\sum_{n=1}^N (P_n)} \quad (3.1)$$

Onde N representa o número de foto-díodos do recetor, α_n representa os ângulos diretores do recetor e P_n representa a potência recebida em cada um dos foto-díodos do recetor.

Assim, para simular o funcionamento deste sistema é necessário entender o campo de visão do sensor, para então ser possível determinar a sua posição.

3.2 Cálculo da posição através da potência

De maneira a saber a potência que o recetor irá receber foi considerado e simulado, em MatLab, uma fonte de luz em que a potência emitida por essa fonte de luz tem uma distribuição lambertiana como é possível ver na figura e 3.2.

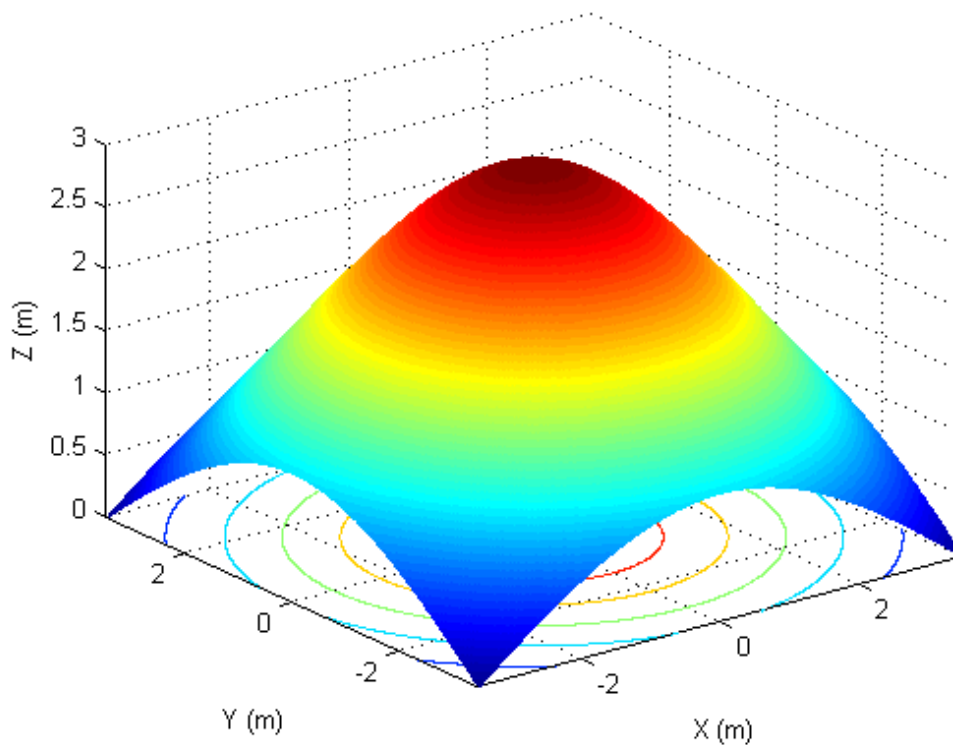


Figura 3.2: Distribuição lambertiana 3D.

Através desta distribuição de luz, foi calculada a potência vista nos 8 foto-díodos do recetor de acordo com a distância real à fonte de luz e os 8 ângulos dos foto-díodos, como é possível ver na figura 3.3.

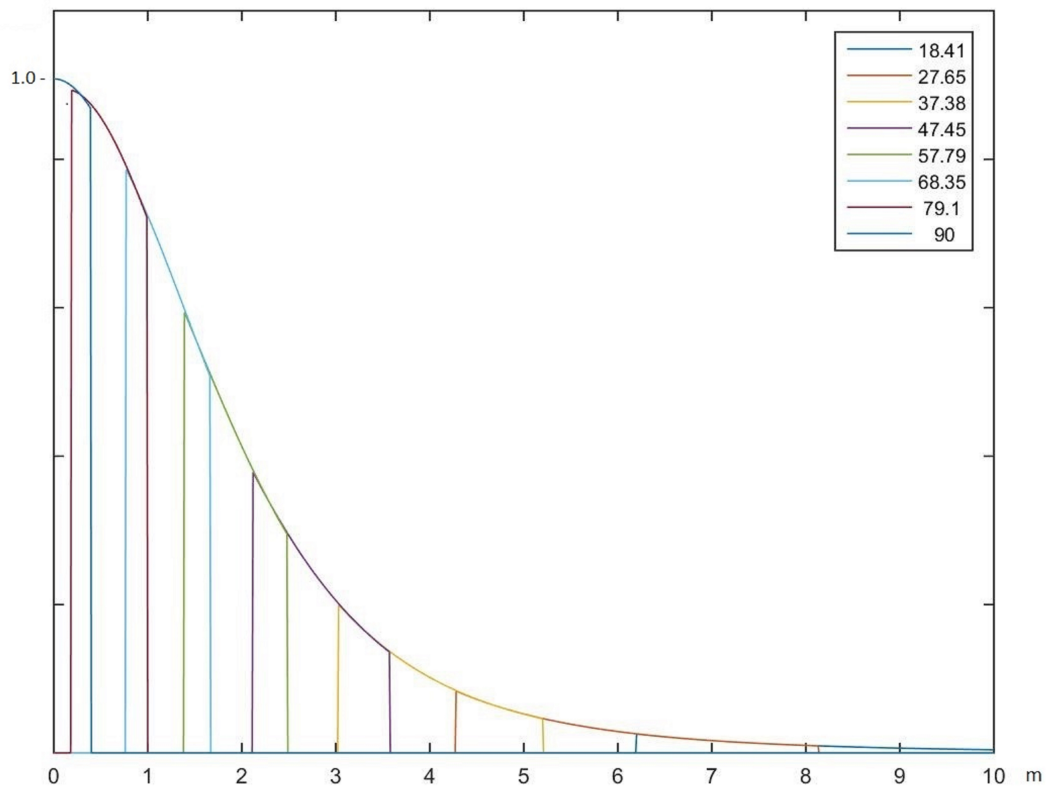


Figura 3.3: Potência relativa nos 8 foto-díodos de acordo com a distância à fonte de luz.

É possível verificar que o recetor vai receber sempre luz em pelo menos 1 foto-díodo e no máximo em 2 foto-díodos. Também se verifica que o alcance de cada foto-díodo aumenta à medida que o ângulo do foto-díodo baixa, como é de esperar. Na figura 3.4 observa-se o resultado desta média pesada à medida que se afasta o recetor de uma fonte de luz, comparando com o ângulo real com que a luz incide no recetor.

A curva resultante apresenta degraus nos ângulos exatos dos foto-díodos do recetor, e apresenta também um degrau por cada par de foto-díodos adjacentes. Estes degraus intermédios não são constantes, variam muito pouco devido à pouca variação da potência recebida quando o campo de visão de dois foto-díodos adjacentes se intercebam. À medida que a distância à fonte de luz aumenta, o ângulo de elevação do foto-díodo ativo é menor, e

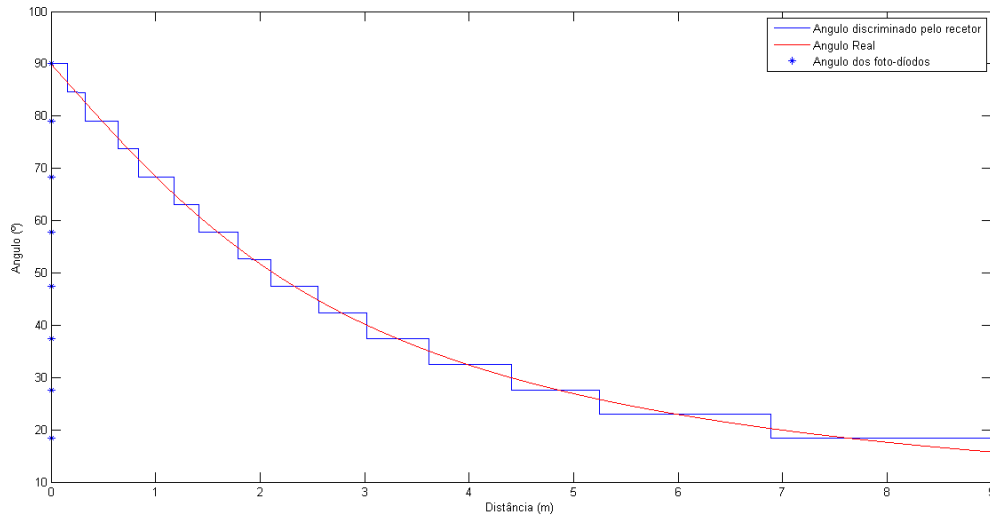


Figura 3.4: Ângulo real e ângulo teórico calculado pelo recetor.

por isso o seu alcance no plano xOy é maior. Após o ângulo incidente de uma fonte de luz ser calculado e sabendo a altura a que se encontra essa fonte de luz, calcula-se a distância no plano xOy do recetor à fonte de luz que vai servir como ponto de referência. Sabendo a posição desse ponto de referência e repetindo o processo para pelo menos mais 2 fontes de luz, é possível aplicar métodos geométricos para determinar a posição do recetor, neste caso por trilateração.

3.3 Algoritmos e Resultados

Neste sub-capítulo são explicados os algoritmos usados para determinar a posição do recetor e os resultados desses algoritmos para diferentes condições como o número de fontes de luz a serem usados e a distância entre fontes de luz. O diagrama representado na figura 3.5 mostra o fluxograma do algoritmo base de simulação em MatLab para calcular a posição do recetor através da potência recebida nos foto-díodos. É importante referir que a interpolação é feita com base no gráfico mostrado na figura 3.3 e os ângulos calculados são os representados pela curva azul no gráfico da figura 3.4.

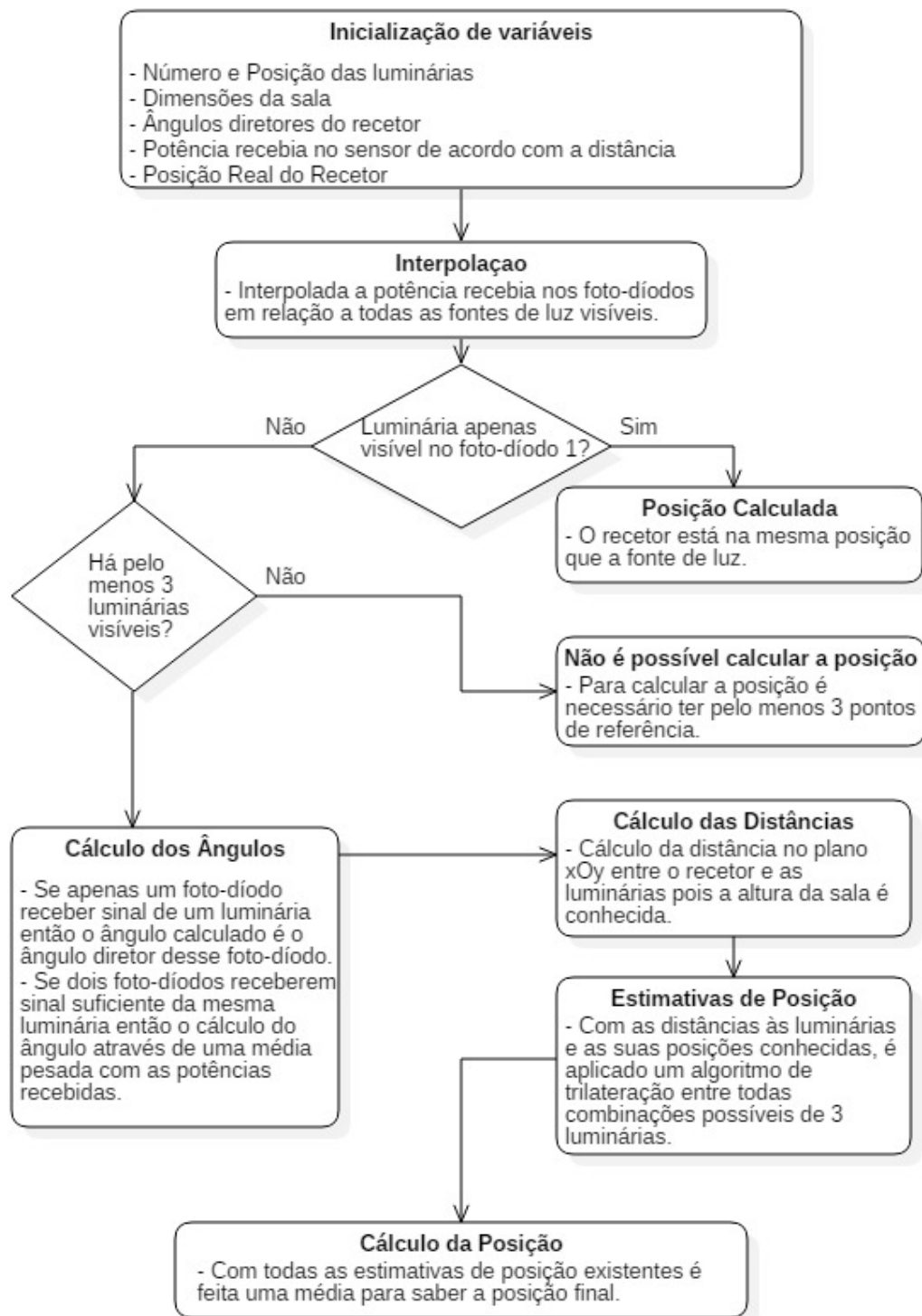


Figura 3.5: Fluxograma do algoritmo de simulação em Matlab

A partir deste algoritmo, algumas modificações foram feitas na inicialização de variáveis de forma a estudar variações na distância entre as fontes de luz e o número de fontes de luz utilizadas, de maneira a saber qual a disposição a utilizar para calcular a posição do recetor com menos erro. Todas as simulações apresentadas neste capítulo têm os parâmetros apresentados na tabela 3.2 e é considerado que o recetor está apontado diretamente a cada fonte de luz.

Tabela 3.2: Tabela de parâmetros constantes para simulação

Altura dos emissores	Dimensões da sala	HPA dos emissores	FOV dos foto-díodos do recetor
3 m	7x7 m	120 °	7.5 °

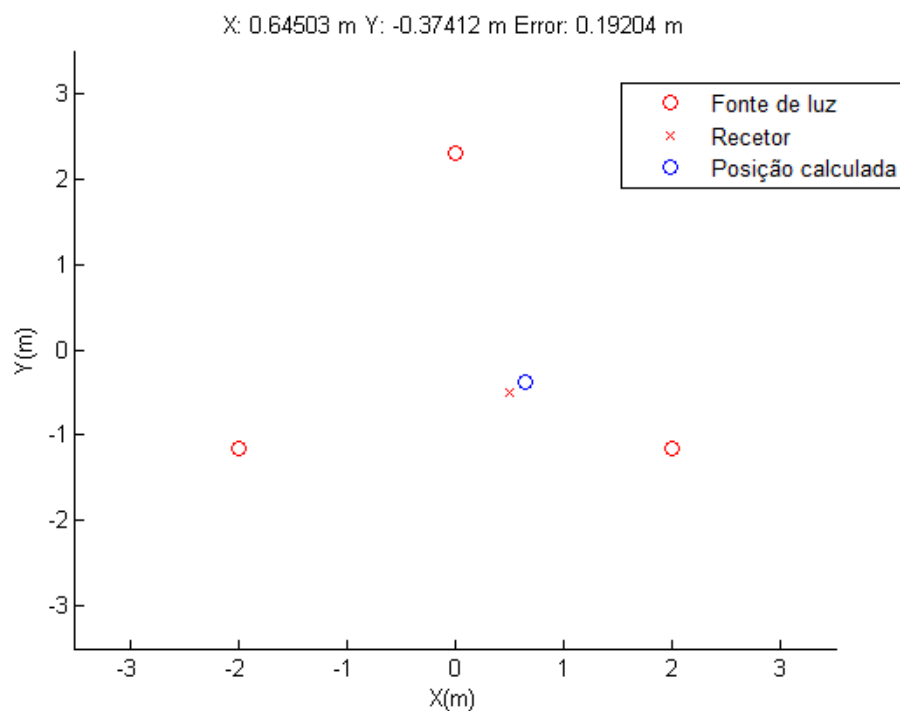


Figura 3.6: Cálculo da posição num ponto com 3 fontes de luz numa distribuição triangular com 2m de raio

A disposição mais simples a ser testada é um triângulo composto por 3 fontes de luz, pois é o número mínimo de pontos de referência necessários para calcular a posição no plano xOy . Um exemplo de cálculo de posição usando esta configuração é demonstrado na figura 3.6.

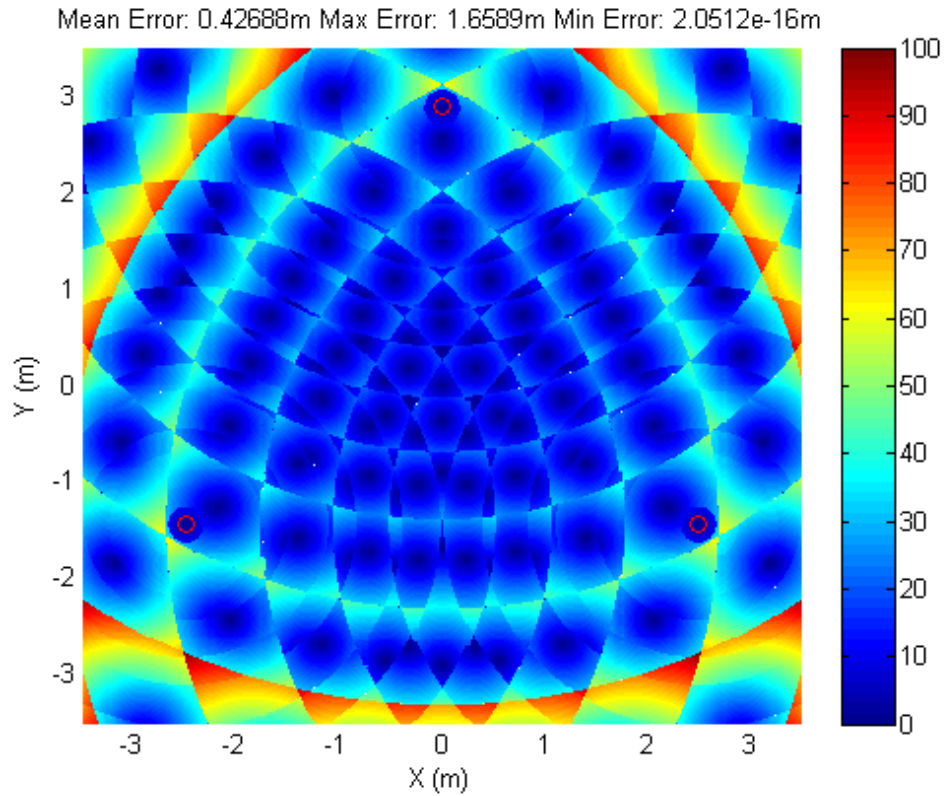


Figura 3.7: Mapa de erro com as luminárias em triângulo com 5m de lado

A figura 3.7 representa uma sala de 7x7m vista de cima, onde os círculos vermelhos representam a posição das fontes de luz e a cor da figura representa o erro, em percentagem, da posição calculada pelo algoritmo MatLab. Por erro entenda-se distância entre a posição real do recetor e a posição calculada pelo algoritmo. A barra de cores vai desde o erro mínimo até ao erro máximo da simulação. O erro mínimo acontece sempre exatamente abaixo das fontes de luz. O erro também é mínimo no centro do triângulo, pois encontra-se à mesma distância dos 3 pontos de referência, ou seja, independentemente do ângulo calculado vai ter o mesmo ângulo para as 3 fontes de luz e essa condição só acontece no

centro do triângulo. É possível ver também o erro médio da sala no topo do gráfico.

A análise do padrão do gráfico sugere arcos de circunferência com centro em cada um dos emissores, os raios destas circunferências podem corresponder às distâncias dos foto-díodos do recetor. O padrão fica ainda mais dividido devido à intersecção das circunferências de cada fonte de luz.

O erro de posição, de forma geral, aumenta com a distância ao centro do triângulo. Estas variações existem devido à forma como o ângulo de receção da fonte de luz é calculado pelo recetor. O erro do ângulo é nulo cada vez que o recetor recebe luz com um ângulo exatamente igual a um dos seus ângulos diretores, e esse erro também é representado no erro do cálculo da posição. Assim, outra situação em que o erro é nulo é quando os ângulos reais em relação aos pontos de referência coincidem exatamente com ângulos diretores do recetor.

De maneira a saber a melhor distribuição de fontes de luz para calcular a posição do recetor, foram feitas várias simulações com o algoritmo representado na figura 3.5 para diferentes distribuições geométricas das fontes de luz e irá ser analisada a influência de características como raio interno do polígono usado como distribuição das fontes de luz e o número de pontos de referência a usar no cálculo da posição do recetor. As fontes de luz encontram-se nos vértices de cada polígono e em alguns casos também no centro do polígono. Todos os polígonos estão centrados exatamente no meio da sala simulada.

Triângulo

A distribuição mais simples que se pode usar é um triângulo pois são necessários pelo menos 3 fontes de luz para obter 3 pontos de referência.

A figura 3.8 é o resultado do mesmo algoritmo de simulação Matlab que a figura 3.7 mas usando as fontes de luz mais perto umas das outras, da esquerda para a direita a distância entre fontes de luz diminui, e como é possível observar pela barra de cores, o erro de posição aumenta significativamente. As figuras estão à mesma escala. Isto acontece porque quanto mais longe o recetor estiver das fontes de luz maior erro na discriminação

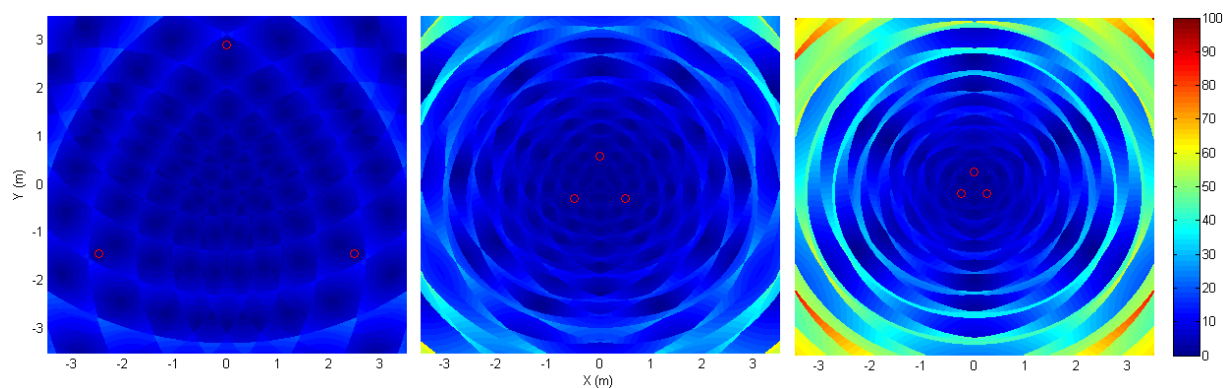


Figura 3.8: Evolução do erro de posição com triângulos de 5m, 1m e 0.5m de lado.

do ângulo, o que se traduz também no erro da posição. Foram feitas mais simulações com diferentes raios do triângulo, desde os 0.144 metros até aos 2.021 metros, de maneira a ver de que forma o raio do polígono formado pelas fontes de luz influencia no cálculo da posição. Para efeitos de comparação foi apenas considerado o erro médio da simulação.

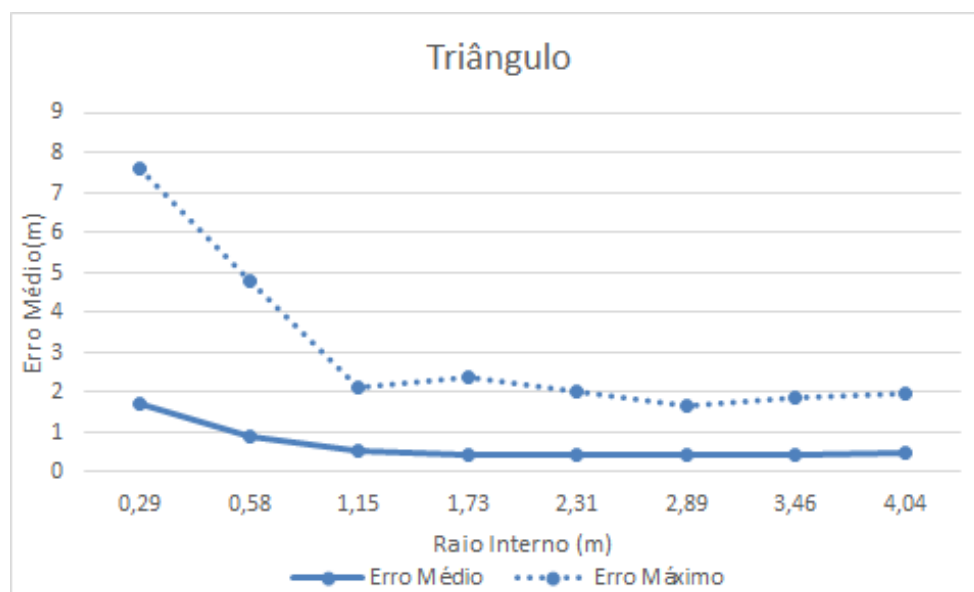


Figura 3.9: Gráfico dos erros de cálculo da posição para luminárias distribuídas em triângulo

Como se pode ver na figura 3.9, inicialmente verifica-se que o erro desce à medida que o raio do polígono aumenta. Contudo, para grandes raios o erro médio aumenta. Isto

acontece porque quando as fontes de luz estão muito afastadas umas das outras, vai sempre haver pelo menos um ângulo discriminado que estará demasiado longe de pelo menos uma fonte de luz. Como o erro do ângulo aumenta com a distância, não é viável ter as fontes de luz muito afastadas umas das outras. Assim, para este caso específico, a melhor solução seria usar um triângulo com 1.155m de raio.

Quadrado

Ao ser acrescentada uma fonte de luz extra, é necessário perceber, além do raio do polígono, qual o número de pontos de referência a usar para ter menor erro. Como temos mais que 3 pontos de referência é possível calcular várias estimativas de posição usando combinações de 3 luminárias.

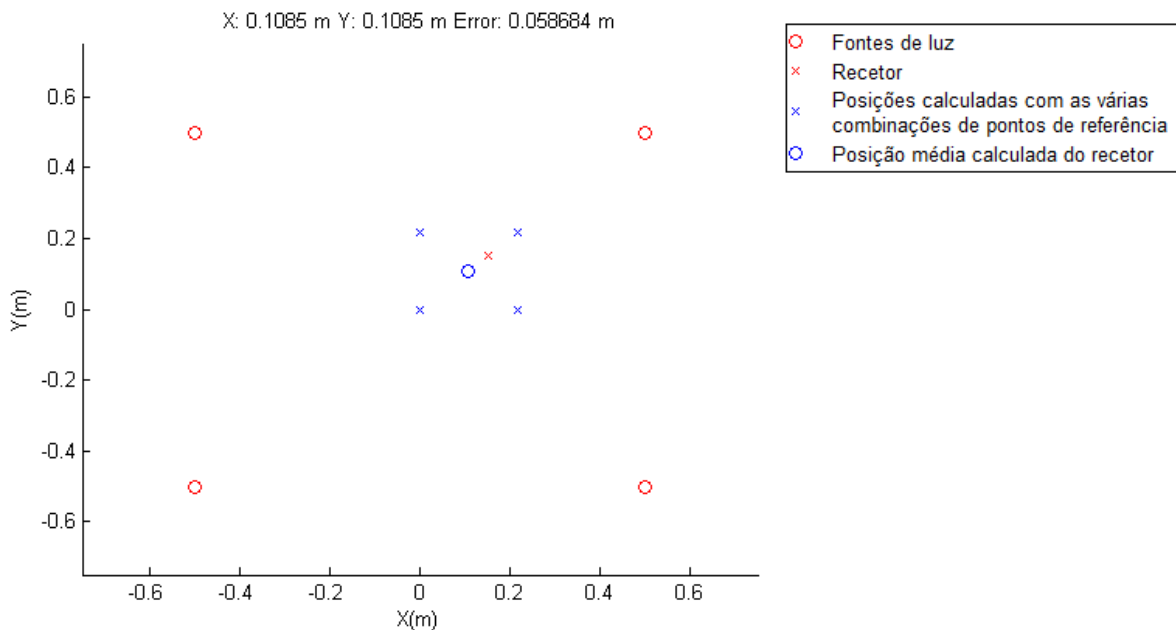


Figura 3.10: Quadrado com 1m de lado usando todas as fontes de luz mais próximas como pontos de referência para calcular 1 ponto

Como é demonstrado na figura 3.10, quando temos 4 pontos de referência é possível calcular 4 posições diferentes usando as 4 diferentes combinações de 3 fontes de luz e fazer um média dessas 4 posições de maneira a reduzir o erro como demonstrado nas equações

3.2 e 3.3.

$$X = \frac{\sum_{n=1}^N (x_n)}{N} \quad (3.2)$$

$$Y = \frac{\sum_{n=1}^N (y_n)}{N} \quad (3.3)$$

Onde x_n e y_n representam as várias estimativas de posição no eixo do X e no eixo do Y respetivamente e X e Y representam a posição calculada final.

Como primeira abordagem usando 4 fontes de luz foi feita uma simulação usando sempre as 3 mais próximas do recetor, ou seja, aquelas com que o recetor vê com maior ângulo.

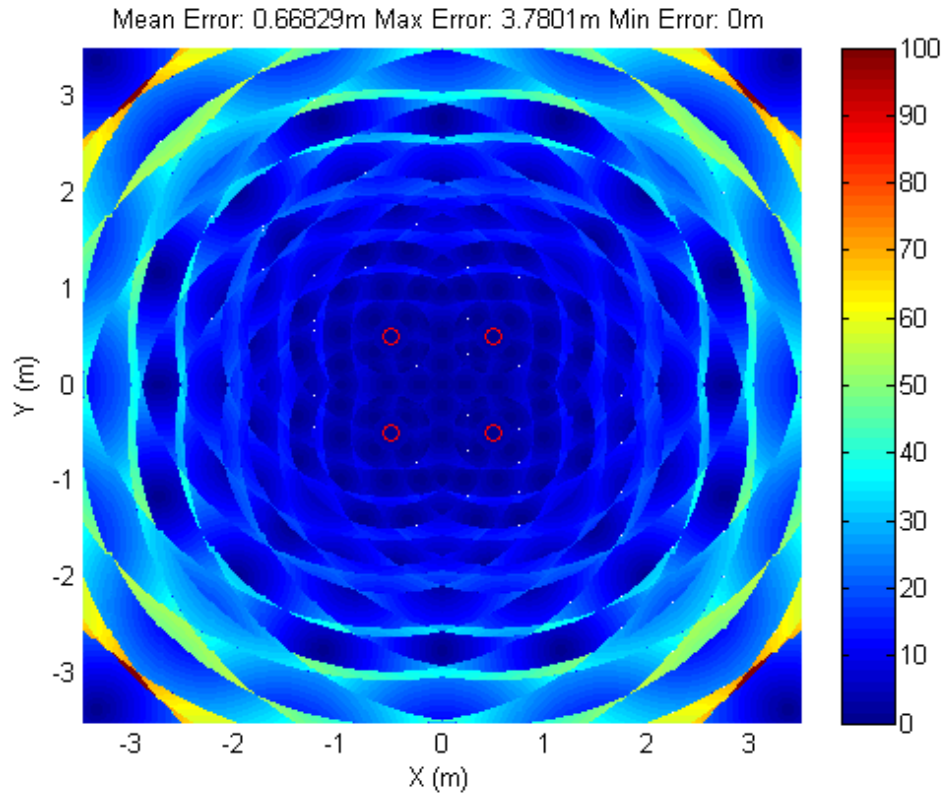


Figura 3.11: Quadrado com 1m de lado usando as 3 fontes de luz mais próximas como pontos de referência

O resultado da simulação com 4 fontes de luz usando apenas as 3 mais próximas como pontos de referência é o que se encontra no gráfico da figura 3.11. É possível observar o

padrão proveniente dos degraus causados pelo recetor ao calcular os ângulos de receção de luz, originando a variação explicada anteriormente.

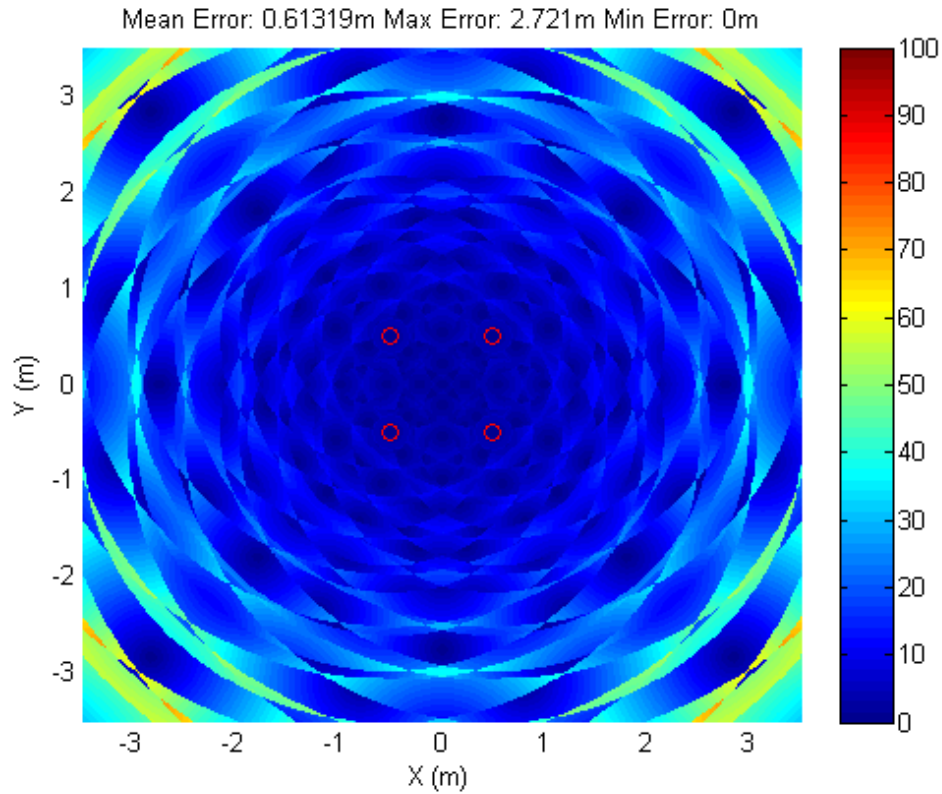


Figura 3.12: Quadrado com 1m de lado usando todas as fontes de luz mais próximas como pontos de referência

A figura 3.12 mostra o resultado da simulação MatLab para o algoritmo que usa a média da posição das várias combinações possíveis de fazer com as 4 fontes de luz. É possível observar que tanto o erro médio como o erro máximo são menores em relação à simulação anterior na figura 3.11. As 2 figuras estão à mesma escala.

De seguida foram feitas simulações variando o raio interno do polígono.

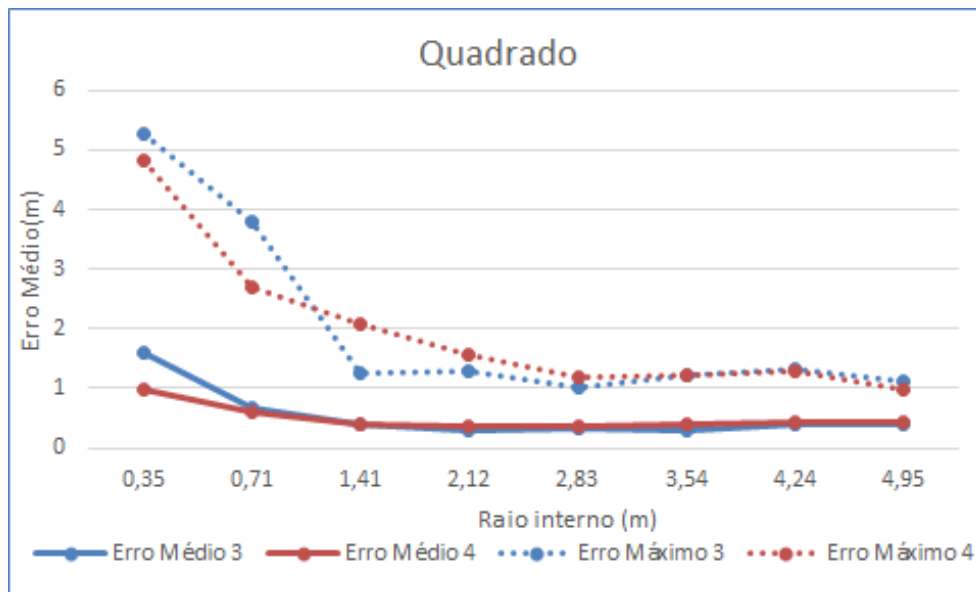


Figura 3.13: Gráfico dos erros de cálculo de posição com 3 e 4 pontos de referência

Na figura 3.13 observa-se o mesmo que no gráfico da figura 3.9, a erro médio baixa à media que o raio aumenta até um certo ponto em que as fontes de luz se encontram muito longe e por isso, a partir daí sobe ligeiramente.

Também é importante observar a diferença entre usar 3 e 4 pontos de referência. Da análise do gráfico conclui-se que nem sempre é melhor usar mais pontos de referência. Se uma das fontes de luz está muito longe do recetor, vai originar muito erro na média da posição, e por isso, nessas situações é melhor usar apenas as 3 mais próximas. De maneira geral, para esta distribuição específica, o melhor é colocar as fontes de luz distanciadas 3 metros umas das outras e usar apenas como pontos de referência as 3 fontes de luz mais próximas. Contudo, para outras distribuições e distâncias, isto pode não ser verdade. Como pode ser observado há casos em que usar mais LEDs resulta numa melhor estimativa da posição do recetor.

Outras distribuições

Foram feitas mais simulações na mesmas condições mas com distribuições das fontes de luz diferentes variando o raio do polígono e o número de pontos de referência a usar. O

título das seguintes figuras indica a distribuição geométrica das fontes de luz.

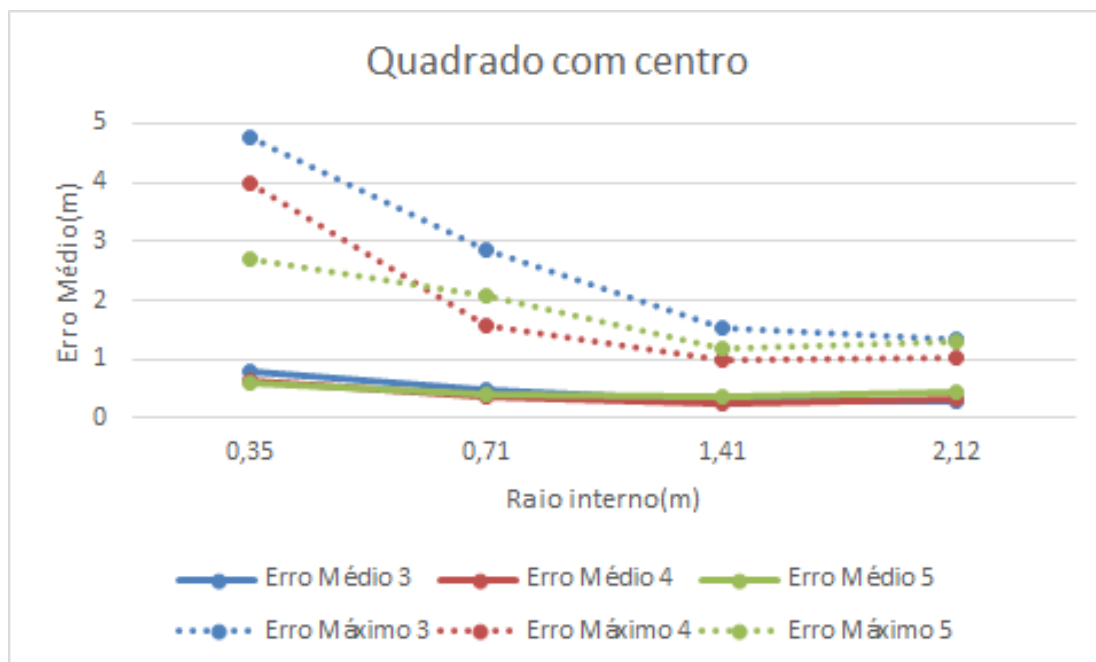


Figura 3.14: Gráfico dos erros de cálculo de posição com 5 pontos de referência

Nas figuras 3.14 a 3.18 é possível observar o mesmo que nos resultados anteriores, à medida que o raio aumenta o erro médio baixa até certo ponto em que deixa de compensar usar os pontos de referência todos pelas razões já acima referidas. Nos casos testados o erro máximo também tende a baixar da mesma maneira que o erro médio.

3.4 Análise dos resultados

Da análise da tabela 3.3 verifica-se que o aumento do número de fontes de luz na sala quase sempre significa um erro médio mais baixo, mesmo que não sejam usadas todas como pontos de referência. Também se pode observar na tabela o erro máximo e o desvio padrão de cada uma das diferentes distribuições com menor erro médio. Verifica-se que, na maior parte dos casos, o erro máximo acompanha a evolução do erro médio. O erro máximo é sempre bastante superior ao erro médio pois são raras as posições onde estes picos de erro acontecessem. Apesar de não estar aqui demonstrado, a evolução dos dois

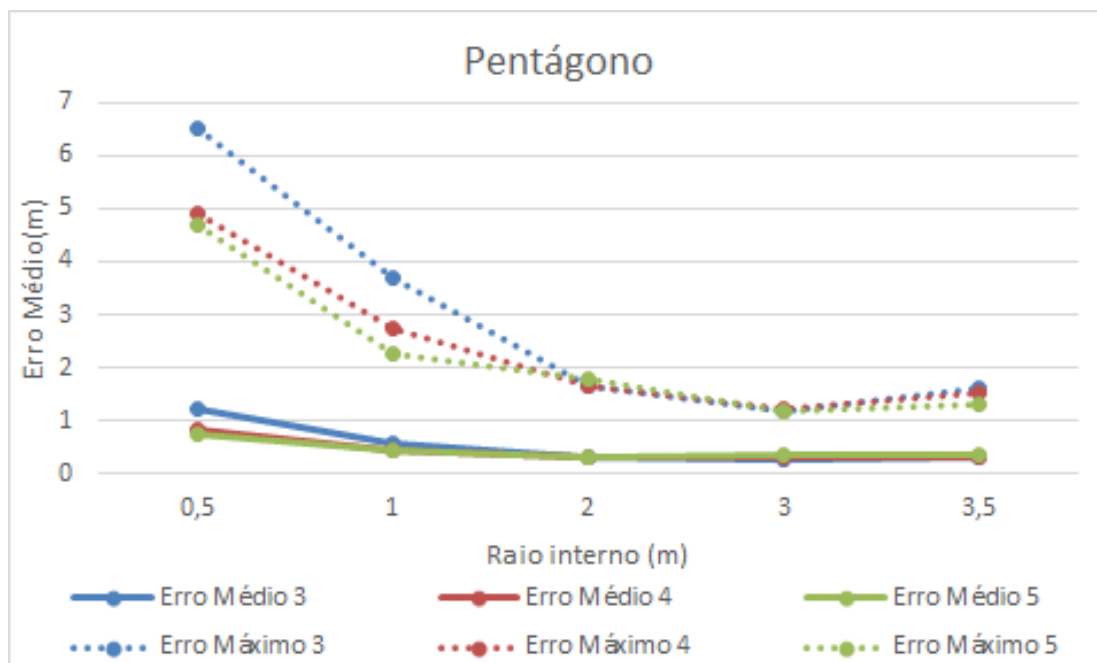


Figura 3.15: Gráfico dos erros de cálculo de posição com 5 pontos de referência (Pentágono)

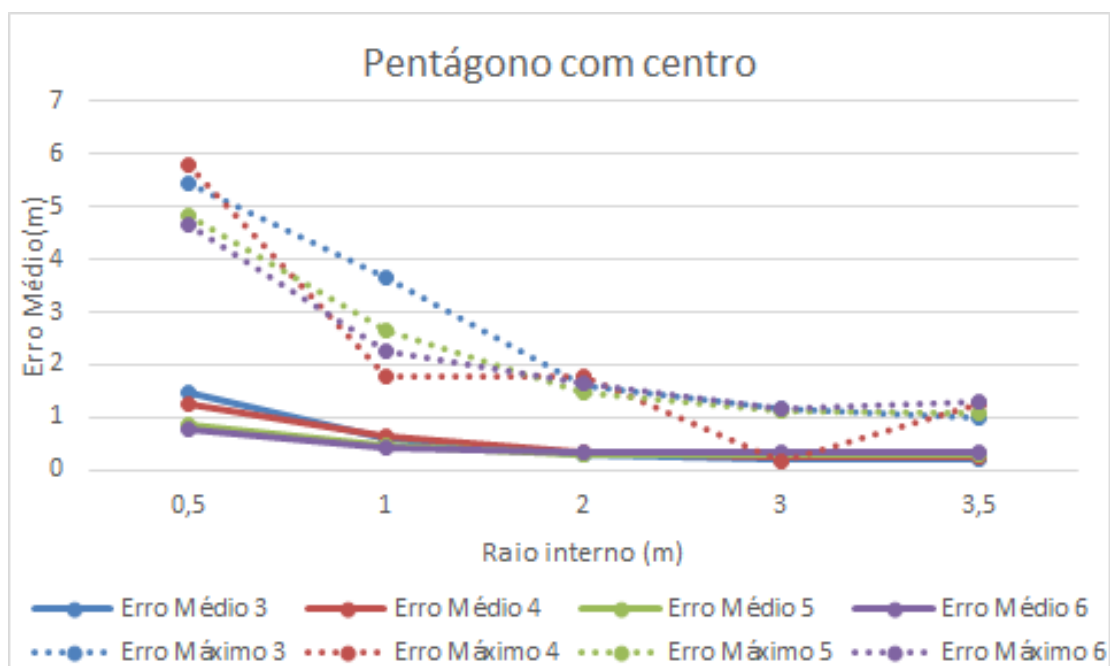


Figura 3.16: Gráfico dos erros de cálculo de posição com 6 pontos de referência

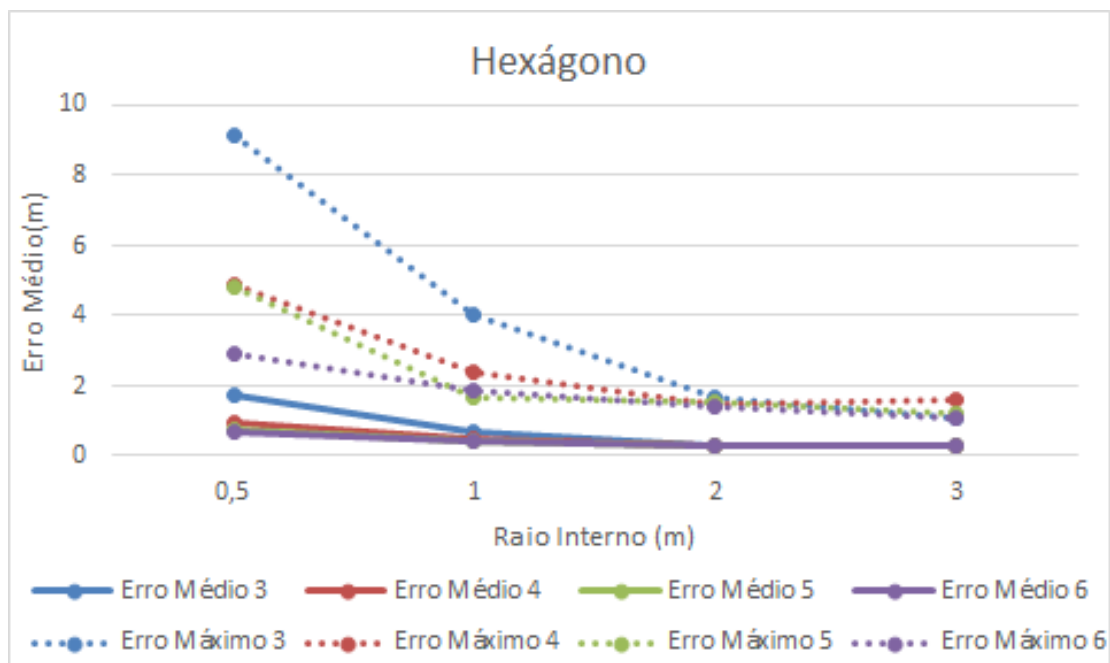


Figura 3.17: Gráfico dos erros de cálculo de posição com 6 pontos de referência (Hexágono)

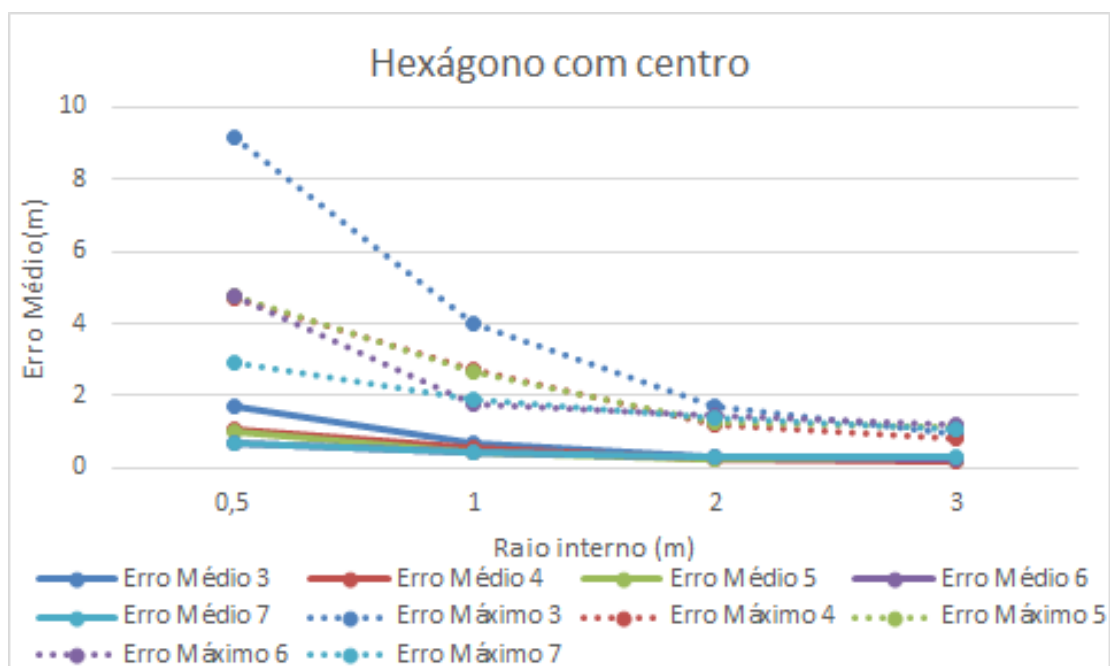


Figura 3.18: Gráfico dos erros de cálculo de posição com 7 pontos de referência

Tabela 3.3: Tabela das diferentes distribuições com menor erro médio.

Distribuição	Raio interno do polígono (m)	Número de pontos de referência usados	Erro Médio (m)	Erro Máximo (m)	Desvio padrão (m)
Triângulo	1.155	3	0.42	2.36	1.32
Quadrado	2.120	3	0.30	1.30	0.19
Quadrado com centro	1.414	4	0.25	1.00	0.17
Pentágono	3.000	3	0.29	1.17	0.17
Pentágono com centro	3.500	3	0.21	0.98	0.13
Hexágono	3.000	4	0.27	1.56	0.17
Hexágono com centro	3.00	4	0.20	0.81	0.12

erros não é sempre igual, é possível o erro médio descer e o erro máximo aumentar, embora sejam raras as exceções nos resultados obtidos. O erro mínimo não está aqui descrito pois é sempre nulo visto que o algoritmo do recetor consegue saber a sua localização exata quando se encontra exatamente na mesma posição de qualquer um dos emissores. Na análise do desvio-padrão também se verifica acompanha a evolução do erro médio e do erro máximo. Também é importante observar que a adição de um LED no centro das distribuições, à exceção do quadrado, piora o erro médio quando os LEDs se encontram muito próximos uns dos outros e melhora quando se encontram mais afastados. É possível observar que usar vários LEDs como pontos de referência pode ser vantajoso se os LEDs não se encontrarem muito afastados uns dos outros. Nesse caso os trios de LEDs mais distantes pioram a estimativa da posição e por isso é mais eficiente usar apenas os trios de LEDs que se encontrem mais perto. Uma maneira de evitar que todos os trios de LEDs tenham o mesmo peso na estimativa de posição seria atribuir pesos diferentes consoante

a potência média recebida por cada um dos trios possíveis. Assim os trios de LEDs mais próximos teriam um maior peso no cálculo da posição. Apesar de o melhor caso ser usar as fontes de luz distribuídas em hexágono com centro com raio de 3 metros e 4 pontos de referência, à exceção do quadrado, nenhuma destas distribuições são comuns para iluminar uma sala e servem apenas para efeitos de teste e simulação.

Capítulo 4

Desenvolvimento do sistema de iluminação LED com suporte para VLC

Neste capítulo é descrito o trabalho feito para a validação experimental do sistema, a implementação de fontes de luz com tecnologia LED, código do recetor para processar sinal e calcular o ângulo e o cálculo da posição com esses ângulos. Também é feita uma análise aos resultados.

4.1 Arquitetura do sistema

Nesta secção é feita a abordagem à arquitetura do sistema, como foi feita a implementação do emissor e o código no recetor implementado em C com recurso a uma PIC32 da Microchip.

4.1.1 Circuito emissor

O circuito emissor é constituído por 2 blocos principais, o driver para os LEDs e um oscilador. Este oscilador serve para que cada fonte de luz tenha a sua própria frequência

e assim depois o recetor consiga discriminar de qual dos emissores está a receber sinal. O recetor terá uma *lookup table* de maneira a fazer a conversão da frequência para posição do emissor.

Foi usado um conversor AC/DC da Myrra com referência 47246 com 12V de tensão máxima e 2W de potência máxima, próprio para montar em PCB. Também tem uma saída extra de 5V que não é usada.

Driver

Os LEDs escolhidos são os XLamp XP-C LED da Cree devido às seguintes características:

- Cor branca
- Baixo custo
- Potência máxima - 2 W
- Corrente máxima - 500 mA
- Eficiência - 96 lm/W
- Ângulo Visão - 115°
- Queda de tensão - 3.4 V @ 350 mA

Como se vê na figura 4.1 o driver usado usa o transístor Q1 como switch ON/OFF para conduzir e não conduzir corrente pelos LEDs. O transístor Q2 serve para regular a corrente nos LEDs, pois força a haver uma queda de tensão em R_e , que é a resistência que define a corrente que passa pelos LEDs, como é demonstrado na equação 4.1.

$$I_{LEDs} = I_c \approx I_e = \frac{V_{BEQ2}}{R_e} \quad (4.1)$$

A base do transístor Q1 vai receber um sinal de controlo a ser emitido pelos LEDs, uma onda quadrada com duty-cycle de 50%.

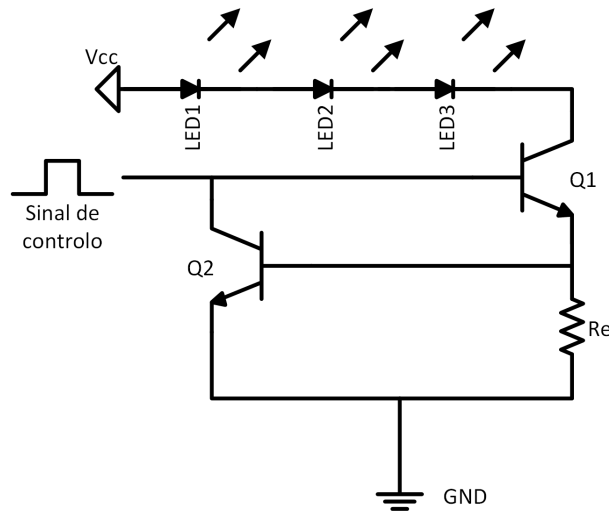


Figura 4.1: Circuito do driver usado para os LEDs

Como a fonte usada tem uma tensão máxima de 12V e uma potência máxima de 2W, é possível usar até 3LEDs em série. A corrente máxima que a fonte fornece é 160mA. O valor de R_e escolhido foi de 2.7 ohm, pois assim a corrente que atravessa os LEDs é de 260mA. O transistor Q1 é um BD203 e recebe um sinal quadrado com um duty-dycle a 50%, por isso esta corrente na prática significa apenas metade, 130mA. Os restantes 30mA são suficientes para alimentar o resto do circuito, como irá ser demonstrado mais à frente.

- Queda de tensão nos LEDs: $3.2V * 3 = 9.6 V$
- Queda de tensão em R_e : $0.7 V$
- $V_{cesat_{max}}$ de Q1: $1 V$

Cada LED está a consumir cerca de 500mW, por isso cada fonte de luz usa 1.5W, o que equivale a 144 Lumen por luminária.

Oscilador

O oscilador foi implementado com um Timer NE555D em configuração astável. A frequência é configurada através de uma resistência $R1$ e um condensador $C1$ que se en-

contram na figura 4.2. O circuito integrado é alimentado com os 12V e por isso a saída é aproximadamente 12V também.

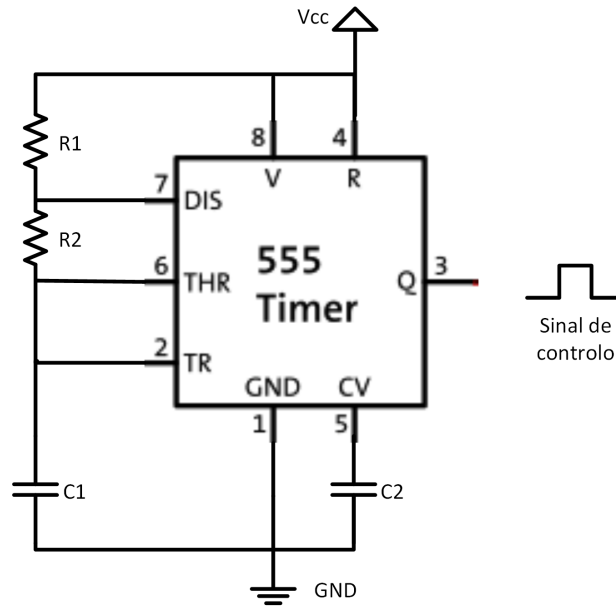


Figura 4.2: Circuito do oscilador usado

A frequência é configurada através das resistências $R1$ e $R2$ e o condensador $C1$ que se encontram na figura 4.2 através da equação 4.2.

$$f = \frac{1.44}{(R1 + 2R2)C1} \quad (4.2)$$

Para ligar a saída do oscilador à base do transístor Q1 do driver foi usada uma resistência para ter a corrente desejada. Na base do transístor Q1 é necessário ter 1.4V pois corresponde aos dois V_{BE} dos dois transístores do driver.

No final a aparência do circuito total do emissor é a que se encontra na figura 4.3. Foram criados em PCB 3 emissores com frequências 1kHz, 3kHz e 4kHz. Estas frequências foram escolhidas pois tinham de ser acima da frequência perceptível ao olho humano (cerca de 100Hz) e abaixo da frequência de corte do transístor Q1 (25kHz).

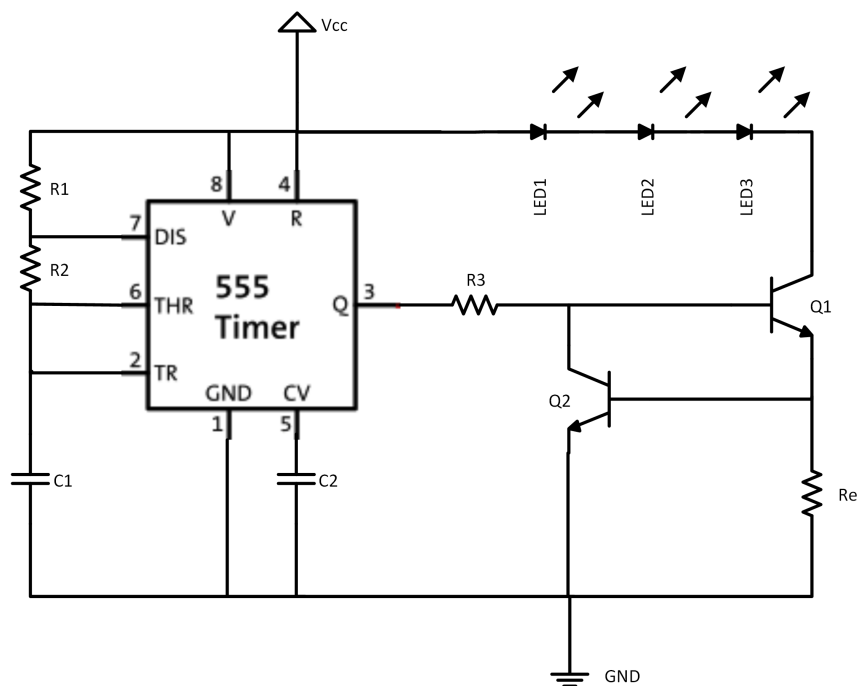


Figura 4.3: Circuito final do emissor

4.1.2 Recetor

O código do recetor foi implementado em linguagem de programação C com recurso a uma PIC32 da Microchip.

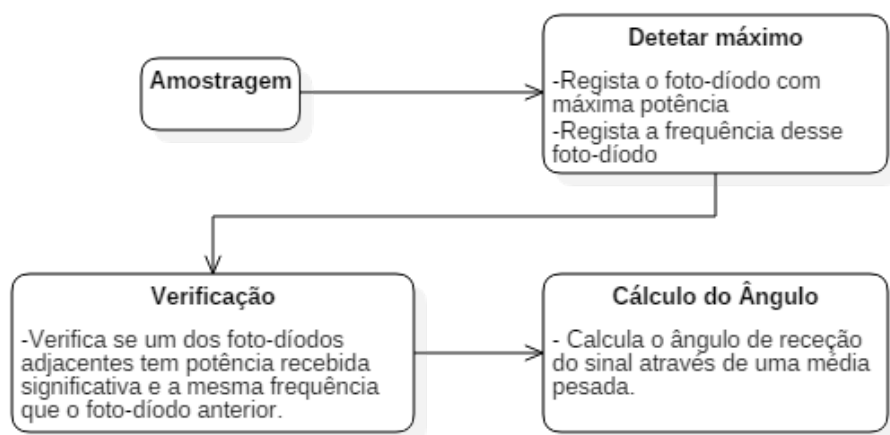


Figura 4.4: Fluxograma do algoritmo do recetor

A figura 4.4 demonstra como o código implementado no recetor funciona. Inicialmente há um período de amostragem para receção do sinal e de seguida faz-se o seu processamento. É feita a verificação do foto-díodo com maior potência recebida e registada a sua frequência para posteriormente ser feita a verificação dos foto-díodos que lhe são adjacentes, ou seja, se têm potência significativa e têm um sinal com a mesma frequência que o foto-díodo anterior. Se um dos foto-díodos adjacentes cumprir estes requisitos, é usado também para efetuar o cálculo do ângulo através da fórmula da média pesada referida anteriormente. A frequência é calculada através das transições ascendentes e descendentes do sinal.

4.2 Procedimentos Experimentais

Nesta secção são abordados os testes experimentais, desde como foram implementados até aos seus resultados e a sua análise. Os testes consistem na medição de ângulos e reconhecimento do emissor pelo recetor. Esses dados depois são introduzidos no Matlab para fazer o cálculo da posição.

Os emissores usados são sempre os mesmos em todos os testes experimentais e têm as características descritas na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Características das fontes de luz 1

	Posição (m)	Frequência (Hz)
Fonte de luz 1	(-1; 0)	1k
Fonte de luz 2	(0; -1)	3k
Fonte de luz 3	(0; 0)	4k

O recetor não foi fabricado com exatamente os ângulos projetados devido à precisão da impressora 3D. Na tabela 4.2 encontram-se os ângulos do recetor.

Daqui em diante qualquer resultado de simulação para efeitos de comparação com os resultados práticos têm em conta os ângulos desta tabela.

Tabela 4.2: Foto-díodos

Foto-díodo	1	2	3	4	5	6	7	8
Ângulo [°]	90.00	79.00	68.50	58.50	48.00	37.50	27.50	18.00

4.2.1 Teste Experimental

Os procedimentos experimentais foram realizados nas condições presentes na tabela 4.3 e o set up usado pode ser visto na figura 4.5, as luminárias encontram-se marcadas a vermelho e as posições a ser testadas estão marcadas pela grelha no chão.

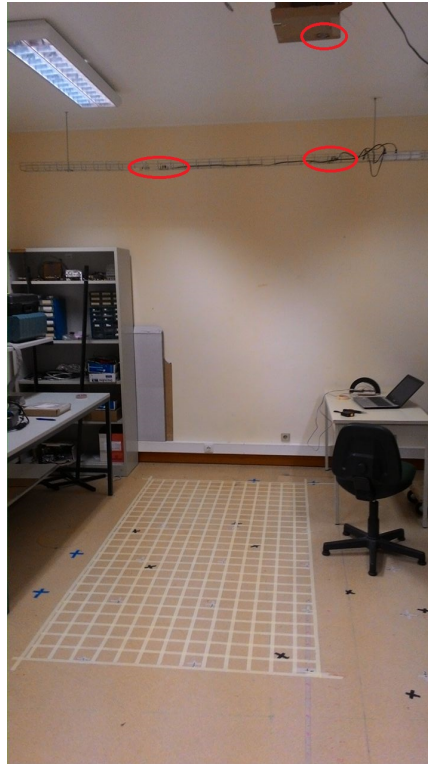


Figura 4.5: Foto do set up usado.

A cada 10 cm da área de teste foi colocado o recetor para medir o ângulo de receção do sinal de cada uma das 3 fontes de luz. De maneira a simular o comportamento de um agente móvel foi feito um varrimento horizontal de 20 graus, de 5 em 5 graus, verificando qual a orientação em que existia mais potência recebida, para saber qual a melhor posição

Tabela 4.3: Constantes do teste experimental

Área	Altura das fontes de luz	Número de fontes de luz	Resolução
1.3x2.537 m	2.54 m	3	10 cm

de receção. A área de teste foi dividida em 14 linhas por 27 colunas, o que perfaz um total de 378 pontos.

Na figura 4.6 é possível ver os resultados das medições da potência recebida para uma das linhas da área de teste. Este gráfico é diretamente comparável com o gráfico resultante da simulação da potência recebida com a distância à fonte de luz representado na figura 3.3 no capítulo 3. Comparando os 2 gráficos conclui-se que de facto a potência recebida é semelhante à esperada, contudo, a passagem de um foto-díodo para o seu foto-díodo vizinho não é tão contínua como era expectável.

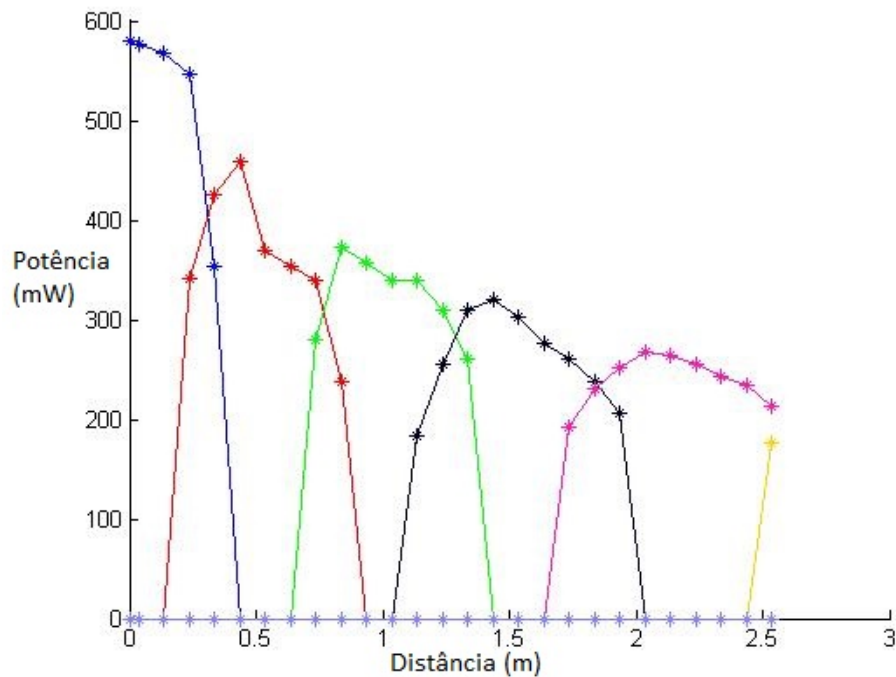


Figura 4.6: Potência recebida em relação à distância no eixo xOy do recetor ao emissor.

Na figura 4.7 é possível observar o ângulo calculado pela PIC32 do recetor. Este gráfico é diretamente comparável com o ângulo teórico do gráfico resultante da simulação do ângulo com a distância à fonte de luz representado na figura 3.4 através da fórmula da média pesada 3.1.

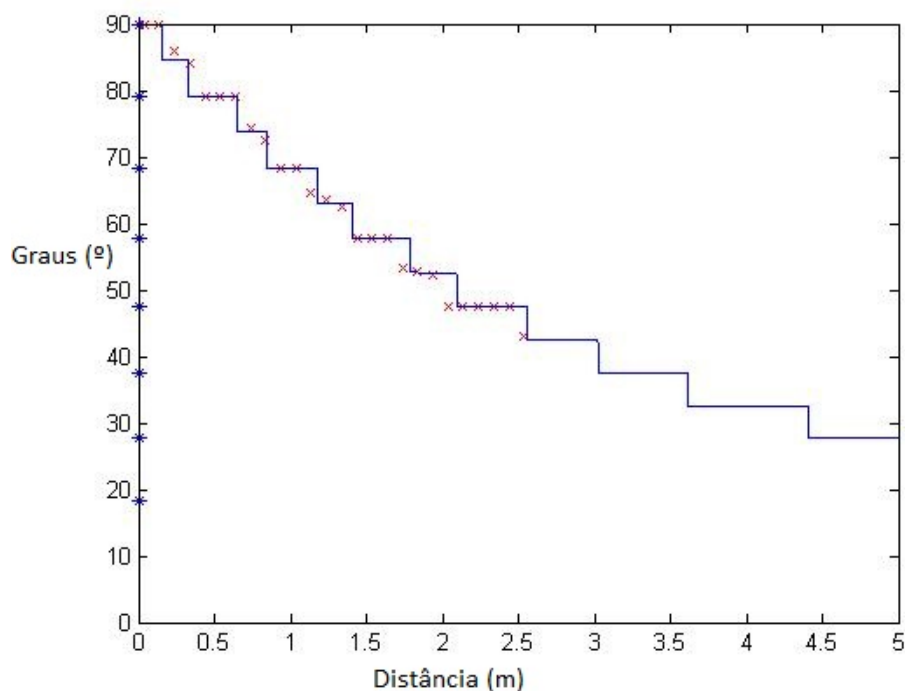


Figura 4.7: Ângulo calculado pelo recetor vs ângulo simulado.

Pode-se observar que os ângulos calculados são próximos da curva teórica de ângulos simulados. Ou seja, quando apenas um foto-díodo recebe luz, o ângulo calculado é igual ao ângulo desse foto-díodo, e quando 2 foto-díodos recebem luz, o ângulo calculado varia ligeiramente pois é o resultado de uma média pesada.

Depois de os dados serem processados no MatLab e a posição ser calculada através de trilateração. Na figura 4.8 pode-se observar o erro esperado calculado pela código se simulação Matlab para as mesmas condições experimentais. Cada retângulo da figura representa um ponto onde foram simuladas as medições. Na figura 4.9 pode-se observar o erro da posição calculada através das medições obtidas neste procedimento experimental.

As duas figuras estão à mesma escala e cada retângulo do mapa representa um ponto de medição e a barra de cores representa o erro de posição em porcentagem em relação ao erro de posição máximo.

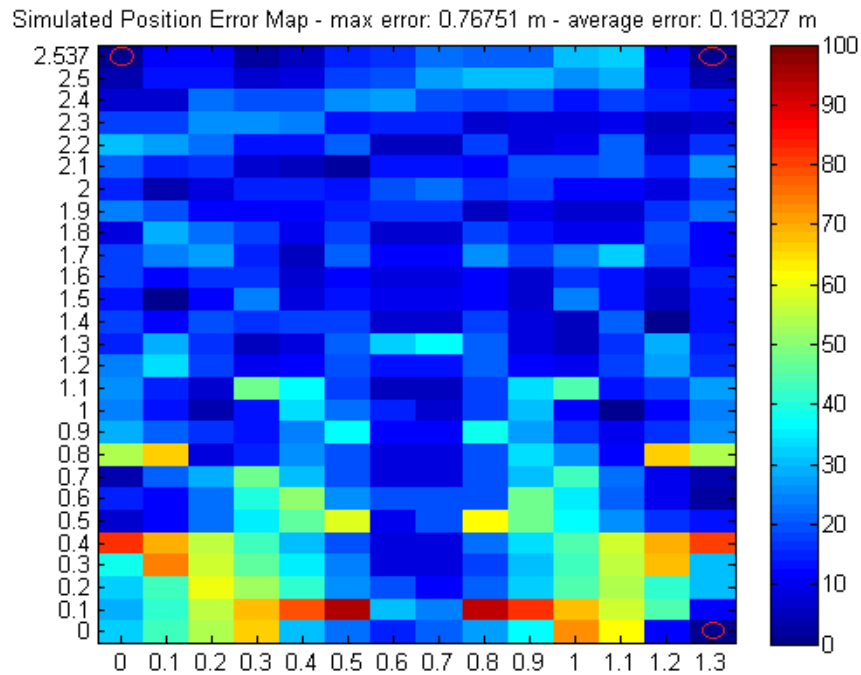


Figura 4.8: Mapa do erro de posição simulado.

4.3 Análise dos resultados

A comparação entre os gráficos 4.8 e 4.9 sugere que os resultados são similares, é possível ver a semelhança nos dois mapas pois em ambos a parte superior da sala tem um erro baixo, e na parte inferior há um padrão de erro maior mas que é similar nos dois gráficos. O erro médio e máximo no mapa simulado e no mapa prático são parecidos, sendo que em ambos é ligeiramente superior nos resultados práticos. As diferenças observadas nos resultados práticos podem ser explicadas por vários fatores, tais como:

- Erros de medição

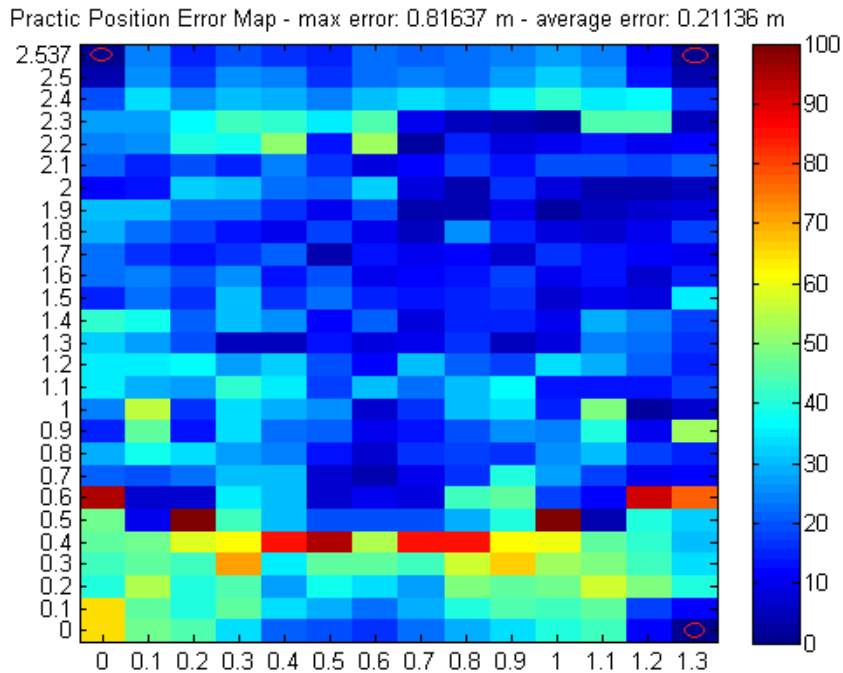


Figura 4.9: Mapa do erro de posição calculada.

-
- Reflexões do sinal na sala - as paredes (visíveis na foto) são brancas e por isso tem um coeficiente de reflexão significativo.
 - Detecção de frequência - O método usado para deteção da frequência origina erro significativo, especialmente quando há reflexões e o mesmo foto-díodo recebe vários sinais.
 - Alinhamento dos fotodíodos no recetor - Devido à imprecisão no processo de fabrico do recetor, é possível que os foto-díodos não estejam perfeitamente alinhados com os ângulos projetados.
 - Orientação do recetor - Como foi referido anteriormente o recetor não esteve sempre orientado diretamente às fontes de luz.

A comparação entre os resultados práticos e os resultados simulados pode ser observada na figura 4.10.

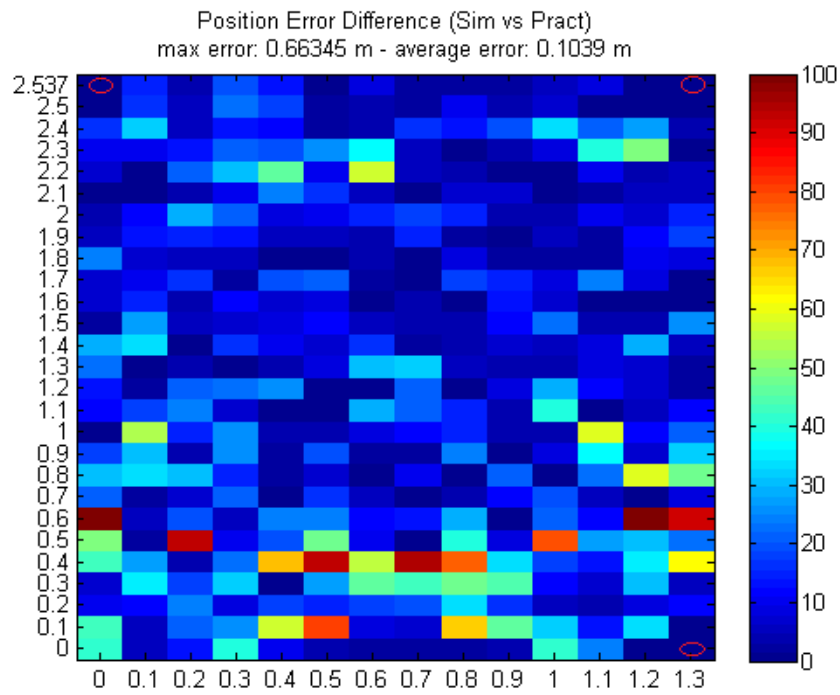


Figura 4.10: Diferença entre o mapa do erro de posição calculada e o mapa de erro da posição simulada.

Do análise dos resultados obtidos comprova-se que o simulador se comporta dentro do esperado.

Capítulo 5

Conclusões e trabalho futuro

5.1 Conclusões

Este trabalho tinha como principal objectivo o estudo e o desenvolvimento de um sistema de localização em ambientes interiores com recurso a comunicação por luz visível.

Foi feito um estudo num ambiente simulado em Matlab para perceber como se comporta um sistema deste tipo variando a distribuição das luminárias e o algoritmos de localização desenvolvidos. Posteriormente foi feito um teste prático para efeitos de comparação com as simulações de maneira a comprovar o sistema.

Dos resultados das simulações pode-se verificar que há condições para haver um sistema de localização em ambientes interiores com recurso a comunicação por luz visível com resultados bastantes precisos.

Dos resultados práticos verificou-se que de facto existem condições para haver um sistema deste tipo e que o algoritmo de simulação é viável de ser utilizado para testar o sistema antes de ser implementado.

5.2 Trabalho Futuro

Como trabalho futuro, na parte das simulações, seria vantajoso ter em conta a reflexão dos obstáculos em espaços interiores. Também seria interessante verificar se a atribuição de pesos aos trios de luminárias mais próximas não diminuiria o erro, ao contrário do que é feito nesta tese em que são todos contados de igual forma. Em relação à parte prática seria vantajoso a realização de mais testes com mais luminárias e com as diferentes distribuições.

É também vantajoso arranjar um método de deteção de frequência mais preciso, ou então outro método para que o recetor consiga distinguir as luminárias, o uso de diferentes palavras codificadas enviadas pelos recetores é uma hipótese. Também é importante referir que os LEDs usados nos testes experimentais aqui descritos não são potentes o suficiente para iluminar o espaço em questão, a realização de testes com LEDs para efeitos de iluminação, e por isso mais potentes, será também uma vantagem para o sistema.

Bibliografia

- [1] F. Duarte, “Localização em espaços interiores por luz visível para robôs móveis,” Master’s thesis, Universidade de Aveiro, 2015.
- [2] C. J. Cohen and F. V. Koss, “Comprehensive study of three-object triangulation,” in *Applications in Optical Science and Engineering*, pp. 95–106, International Society for Optics and Photonics, 1993.
- [3] R. Roberts, “Tdoa localization techniques,” *Harris Corporation*, vol. 4, 2004.
- [4] G. World, “In-location alliance to promote location-based indoor solutions,” September 2012. [Online; posted September-2012].
- [5] B. McClendons, “A new frontier for google maps: mapping the indoors,” November 2011. [Online; posted 29-November-2015].
- [6] M. Campbell, “Apple tech uses wi-fi access points for indoor navigation, 3d positioning,” April 2014. [Online; posted 15-April-2014].
- [7] Locata, “Locata technology brief,” July 2014. [Online; posted July-2014].
- [8] R. Merritt, “Nokia tweaks bluetooth for indoor navigation,” November 2011. [Online; posted November-2011].
- [9] Charles, “ibeacon- the game changer in instore navigation,” December 2013. [Online; posted December-2013].

- [10] I. Greg Sterling, Senior Analyst, “Magnetic positioning - the arrival of ‘indoor gps’,” June 2014. [Online; posted June-2014].
- [11] C. Mims, “A new microchip knows just where you are, indoors and out,” April 2012. [Online; posted April-2012].
- [12] GordonPovey, “Flash-matic and the light telephone,” May 2012. [Online; posted May-2012].
- [13] Osram, “Led basics,” September 2010. [Online; posted September-2010].
- [14] Z. Liu, S. Liu, K. Wang, and X. Luo, “Status and prospects for phosphor-based white led packaging,” *Frontiers of Optoelectronics in China*, vol. 2, no. 2, pp. 119–140, 2009.
- [15] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab®*. CRC Press, 2012.
- [16] M. Yoshino, S. Haruyama, and M. Nakagawa, “High-accuracy positioning system using visible led lights and image sensor,” in *2008 IEEE Radio and Wireless Symposium*, pp. 439–442, IEEE, 2008.
- [17] S. Hann, J.-H. Kim, S.-Y. Jung, and C.-S. Park, “White led ceiling lights positioning systems for optical wireless indoor applications,” in *36th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, 2010.
- [18] M. S. Rahman, M. M. Haque, and K.-D. Kim, “Indoor positioning by led visible light communication and image sensors,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 1, no. 2, p. 161, 2011.
- [19] M. Nakajima and S. Haruyama, “Indoor navigation system for visually impaired people using visible light communication and compensated geomagnetic sensing,” in *2012 1st IEEE International Conference on Communications in China (ICCC)*, pp. 524–529, IEEE, 2012.

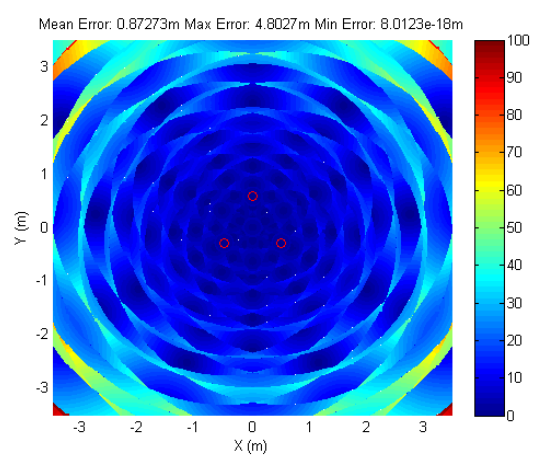
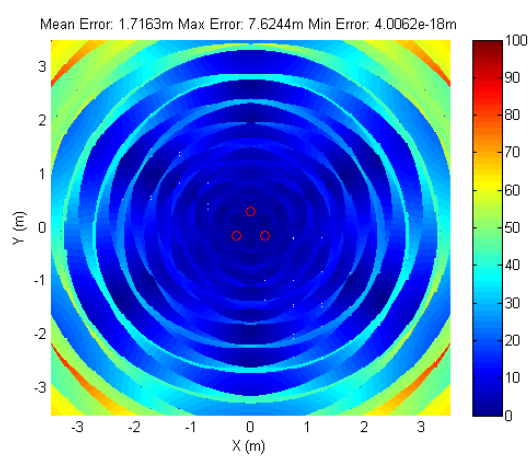
- [20] M. Biagi, A. M. Vegni, and T. D. Little, “Lat indoor mimo-vlc—localize, access and transmit,” in *Optical Wireless Communications (IWOW), 2012 International Workshop on*, pp. 1–3, IEEE, 2012.
- [21] A. Brands, “Acuity brands indoor positioning services white paper,” March 2015. [Online; posted 11-March-2015].
- [22] A. Brands, “Bytelight™ services: Indoor positioning system,” May 2015. [Online; posted 08-May-2015].
- [23] GELighting, “Indoor positioning system,” March 2015. [Online; posted 20-March-2015].

Apêndice A

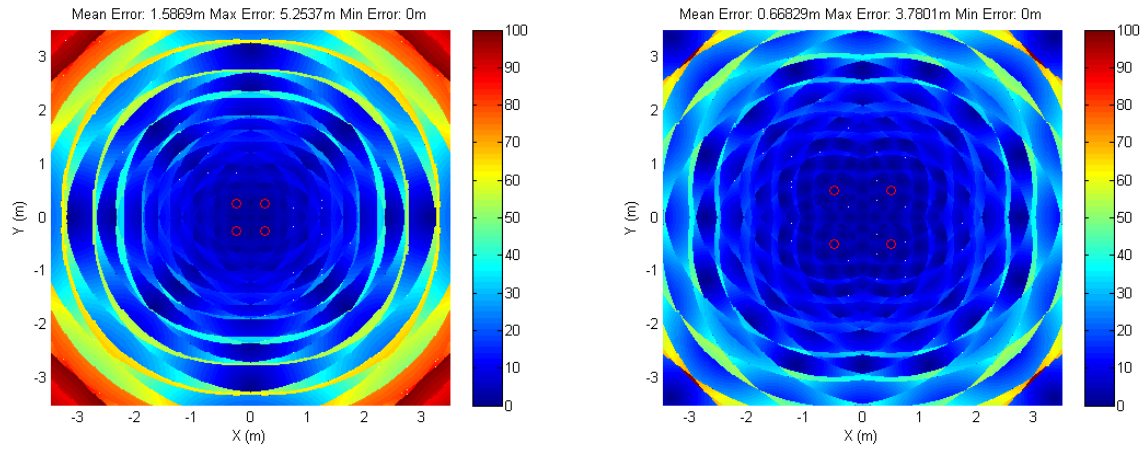
Anexos

A.1 Gráficos

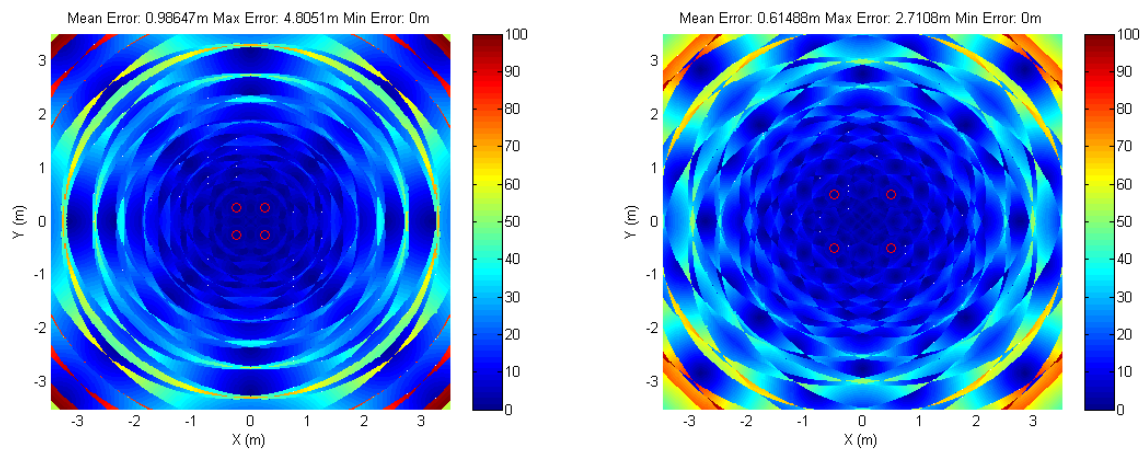
A.1.1 Triângulo



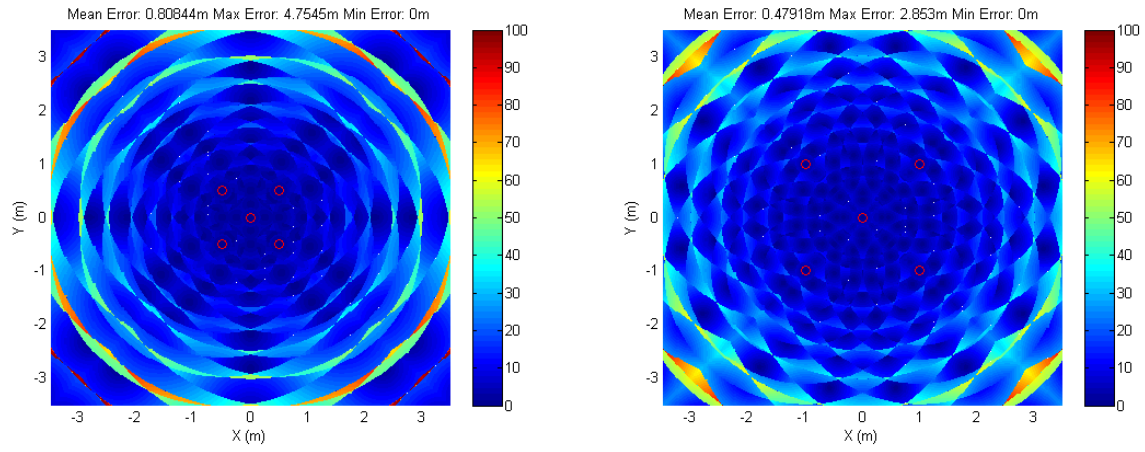
A.1.2 Quadrado com 3 pontos de referência



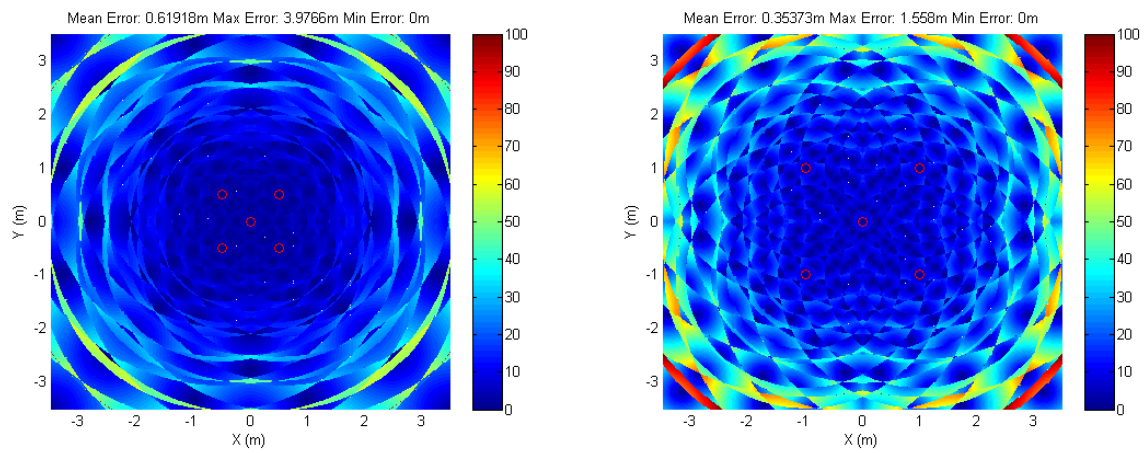
A.1.3 Quadrado com 4 pontos de referência



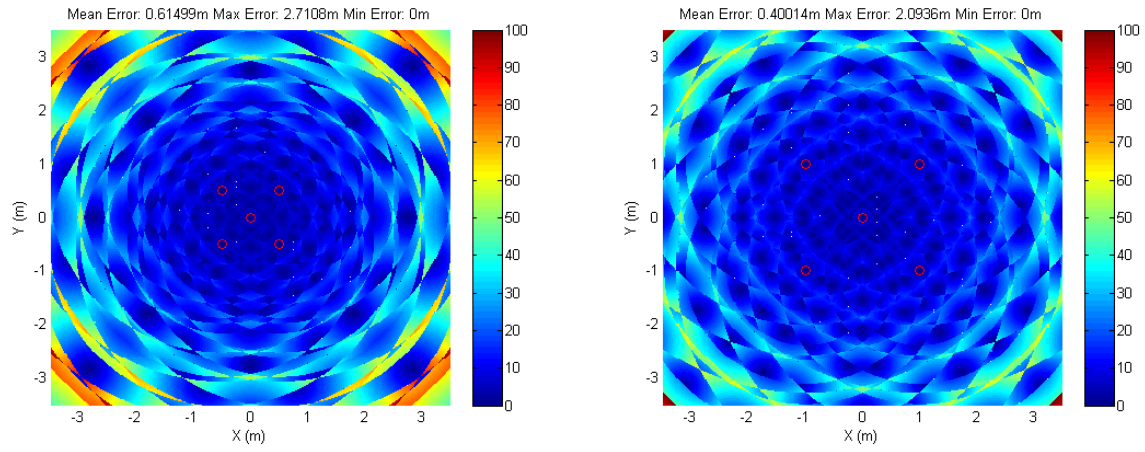
A.1.4 Quadrado com centro com 3 pontos de referência



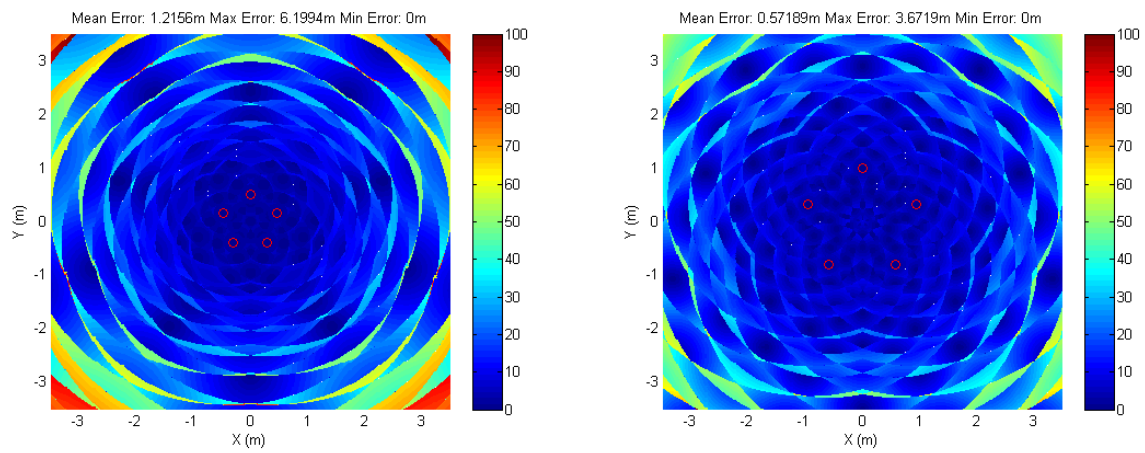
A.1.5 Quadrado com centro com 4 pontos de referência



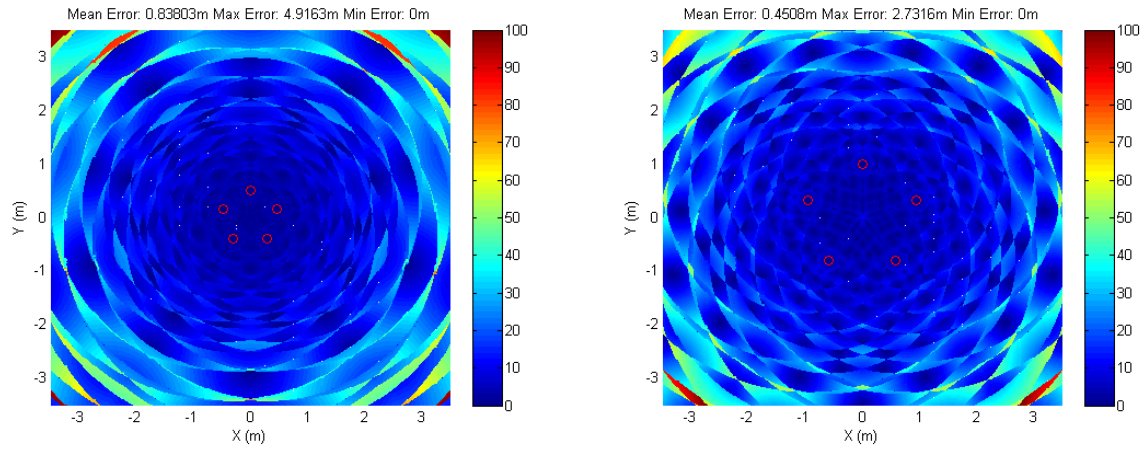
A.1.6 Quadrado com centro com 5 pontos de referência



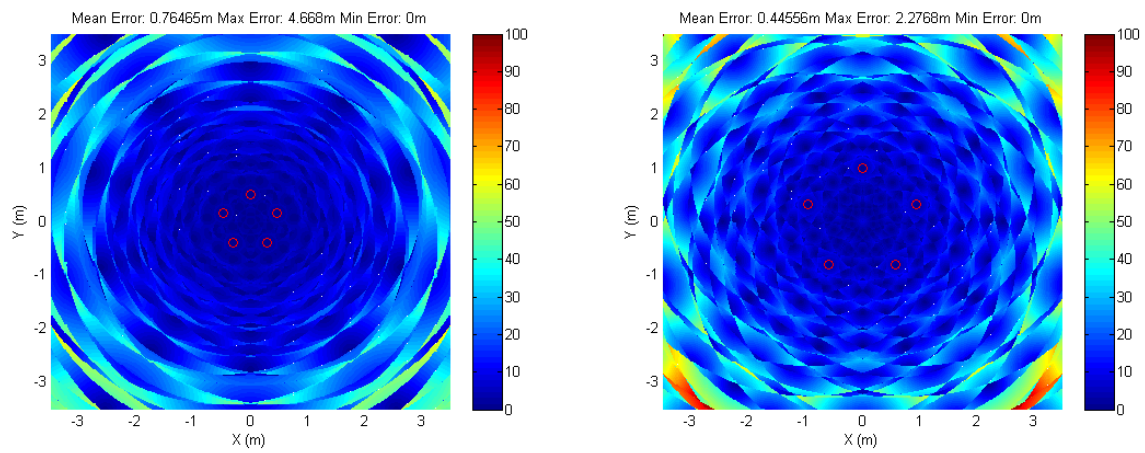
A.1.7 Pentágono com 3 pontos de referência



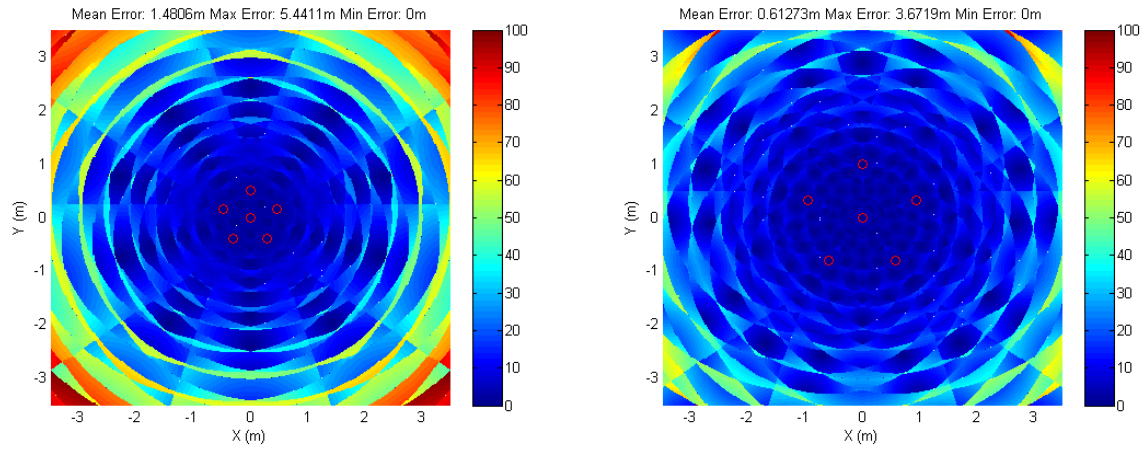
A.1.8 Pentágono com 4 pontos de referência



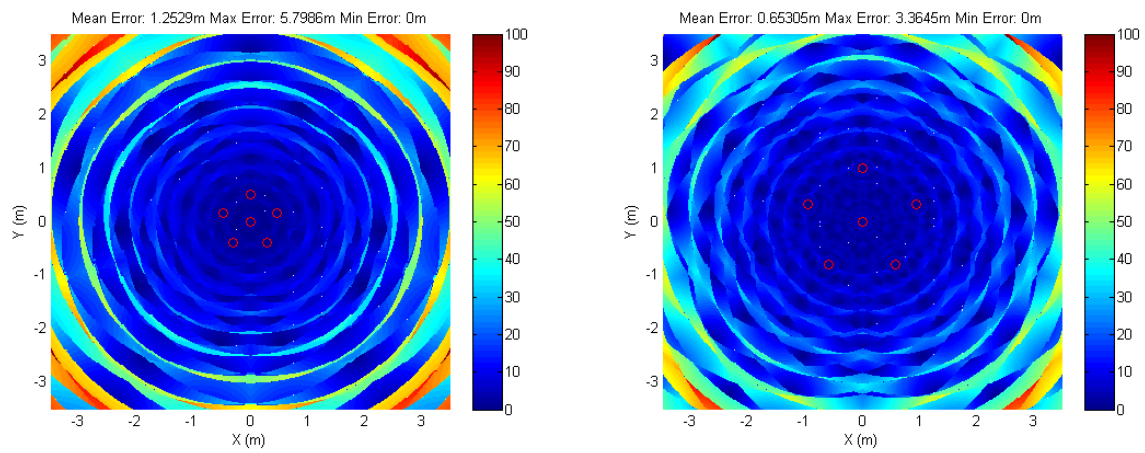
A.1.9 Pentágono com 5 pontos de referência



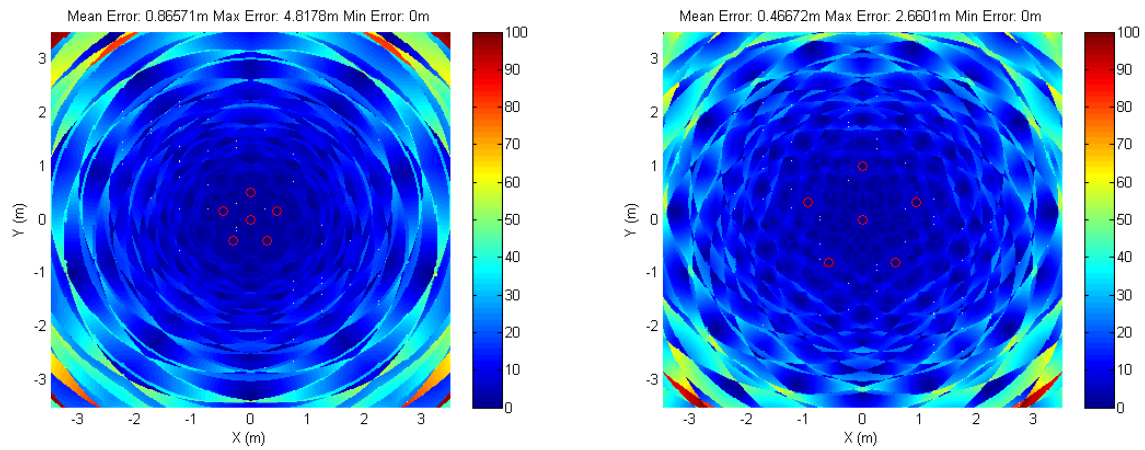
A.1.10 Pentágono com centro 3 pontos de referência



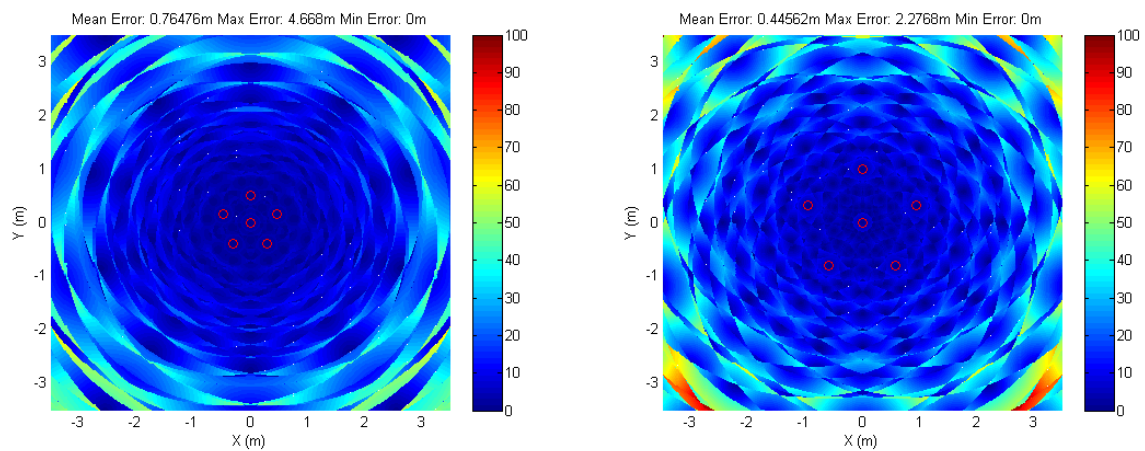
A.1.11 Pentágono com centro com 4 pontos de referência



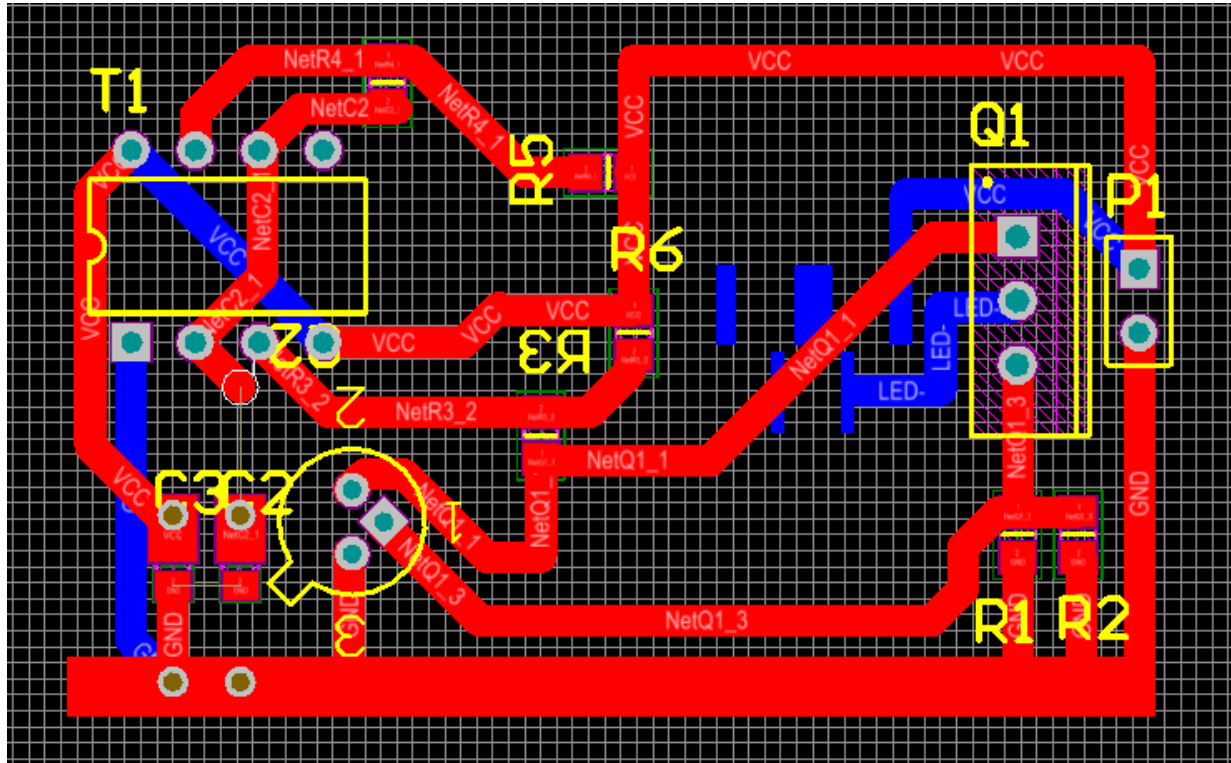
A.1.12 Pentágono com centro com 5 pontos de referência



A.1.13 Pentágono com centro com 6 pontos de referência



A.2 PCB



A.3 Código

A.3.1 Matlab

main

```
tic;
clear all; clc; close all;
format long;
pause on
w=1;
global XR YR
% receiver plan e grid
h=3;
% variaveis globais inicializadas
%
angulo_director = [18.41 27.65 37.38 47.45 57.79 68.35 79.10 90];

l=3.5;
x1 = l*cos(2*pi/5);
x2 = l*cos(pi/5);
y1 = l*sin(2*pi/5);
y2 = l*sin(4*pi/5);
P(1,:) = [0 1];
P(2,:) = [-y1 x1]; P(3,:) = [y1 x1];
P(6,:) = [0 0];
P(4,:) = [-y2 -x2]; P(5,:) = [y2 -x2];
%plot3(P(:,1), P(:, 2), ones(length(P(:,1)), length(P(:,2)))*100,
'ro');
```

```

lx=7; ly=lx; lz=3;
n=50; %graph resolution
Nx=lx*n; Ny=ly*n;
% number of grid in the receiver plan
x=-lx/2:lx/Nx:lx/2;
y=-ly/2:ly/Ny:ly/2;
[XR,YR]=meshgrid(x,y);

k = length(P);
B = combs_no_rep(k,3);
error = zeros(length(XR), length(YR));
for i=1:length(XR)
    for j=1:length(YR)
        [errorTrila X Y V] = errorCalcErr(P, i, j, h, k,
            angulo_director, B, XR, YR);
        error(i,j) = errorTrila;
        if (length(XR)==1)
            Rview(P, x, y, error, lx, ly, XR, YR, X, Y, V)
        end
    end
    (i)/(length(XR))*100
end
if (length(XR)>1)
    Rview(P, x, y, error, lx, ly, XR, YR)
end
toc();

```

Trilateration

```

function [ X Y ] = trilateration( P1, P2, P3, C1, C2, C3 )

```

```

%function [ X Y ] = triangulationToTal( P, D )

h = 2.54;
D1 = h ./ tan(C1); %distance in XOY plane according to colatitude
D2 = h ./ tan(C2);
D3 = h ./ tan(C3);

%distance from each LED to each position
A = [(P2(1,1) - P1(1,1)) (P2(1,2) - P1(1,2));
      (P3(1,1) - P1(1,1)) (P3(1,2) - P1(1,2))];

B = [(D1.^2 - D2.^2 + P2(1,1)^2 + P2(1,2)^2 - P1(1,1)^2 - P1(1,2)
      ^2)/2;
      (D1.^2 - D3.^2 + P3(1,1)^2 + P3(1,2)^2 - P1(1,1)^2 - P1(1,2)^2)
      /2;];

L = (A.' * A)^-1 * A.' * B;
%L = A^-1 * B;
X = L(1,1);
Y = L(2,1);

Position calculation

function [ errorTrila X Y V ] = errorCalcErr( P, i, j, h, k,
        angulo_director, B, XR, YR);
%global XR YR
load( 'RX.mat', 'RX' );

PR = zeros(1, 8);
for q=1:k

```

```

D = sqrt((P(q,1)-XR(i,j)).^2 + (P(q,2)-YR(i,j)).^2);
%elevation = radtodeg(atan2(3,sqrt((P(q,1)-XR(i,j)).^2 + (P(
    q,2)-YR(i,j)).^2)))
PR(1:8) = interp1(linspace(0,9,9001), RX, D, 'pchip', '
    extrap');
PR(PR<0) = 0;
if(sum(PR(1:7))==0 && PR(8)>0)
    V(1, 1) = P(q,1);
    V(1, 2) = P(q,2);
    X = mean(V(:,1));
    Y = mean(V(:,2));
    errorTrila = sqrt((XR(i, j)-X).^2+(YR(i, j)-Y).^2);
    return;
end
if(sum(PR)==0)
    C(q)=0;
else
    C(q) = sum(degtorad(angulo_director).*PR)./(sum(PR));

end
PA(q) = max(PR);
end
[sortC index] = sort(C, 'descend');
%index(sortC<18)=[];

if(length(index)<3)
    X = NaN;

```

```

Y = NaN;
errorTrila = NaN;
V = NaN;
return;
end
% if (length(index)==3)
%     n=3;
% else
%     n=4; %usa n leds mais proximos
% end
n=3;

B(B(:,1)>n,:) = [] ;
B(B(:,2)>n,:) = [] ;
B(B(:,3)>n,:) = [] ;
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

tol = 1e-2;
p=1;
gh=0;
for f=1:length(B(:, 1))
    PL1 = P(index(B(f,1)), 1:2);
    PL2 = P(index(B(f,2)), 1:2);
    PL3 = P(index(B(f,3)), 1:2);
    %[index(B(f,1)); index(B(f,2)); index(B(f,3))]'
    data = squeeze([PL1; PL2; PL3]);
    if(abs(det([data, ones(3,1)])) > tol)

```

```

        L(p, :) = B(f, :);
        p = p+1;
elseif (length(index)>3 && gh==0 && n==3)
    L(p, 1) = B(f, 1);
    L(p, 2) = B(f, 2);
    L(p, 3) = B(f, 3)+1;
    p = p+1;
    gh=1;
end
end
if (p==1)
    X = NaN;
    Y = NaN;
    errorTrila = NaN;
    V = NaN;
    return;
end

L = unique(L, 'rows');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%L = B;
V = zeros(length(L(:,1)), 2);

for f=1:length(L(:,1))
    PL1 = P(index(L(f,1)), 1:2);
    PL2 = P(index(L(f,2)), 1:2);
    PL3 = P(index(L(f,3)), 1:2);
    %[index(L(f,1)); index(L(f,2)); index(L(f,3))]'

```

```

CL1 = C(index(L(f,1)));
CL2 = C(index(L(f,2)));
CL3 = C(index(L(f,3)));
    %radtodeg([CL1 CL2 CL3])

[X1 Y1] = trilateration(PL1, PL2, PL3, CL1, CL2, CL3);
V(f, 1) = X1;
V(f, 2) = Y1;
end

```

```

X = mean(V(:,1));
Y = mean(V(:,2));
errorTrila = sqrt((XR(i, j)-X).^2+(YR(i, j)-Y).^2);

```

Room view

```

function [] = Rview(P, x, y, errorTrila, lx, ly, XR, YR, X, Y, V)
pause on
filename = 'quad4.gif';
figure(3);
set(gcf, 'color', 'w');
hold on;
%axis([-2 2 -2 2 0 100])
    plot3(P(:,1), P(:, 2), ones(length(P(:,1)), length(P(:,2)))
        *100, 'ro');

if (length(errorTrila)==1)
    plot(XR, YR, 'rx');

```



```

% drawnow
% frame = getframe(1);
% im = frame2im(frame);
% [A,map] = rgb2ind(im,256);
% imwrite(A,map,filename,'gif','LoopCount',0,'DelayTime',1);
% pause(2)
V(isnan(V(:,1)),:)=[];
plot(V(:,1), V(:,2), 'bx');
% drawnow
% frame = getframe(1);
% im = frame2im(frame);
% [A,map] = rgb2ind(im,256);
% imwrite(A,map,filename,'gif','WriteMode','append','
DelayTime',1);
% pause(1)
X(isnan(X(:,1)),:)=[];
Y(isnan(Y(:,1)),:)=[];
errorTrila(isnan(errorTrila(:,1)),:)=[];
plot(X, Y, 'bo');
title(['X: ' num2str(X) ' m Y: ' num2str(Y) ' m Error: '
num2str(errorTrila) ' m']);
xlabel('X(m)');
ylabel('Y(m)');
string = ['Posicoes calculadas com as varias' char(10) '
combinacoes de pontos de referencia'];
axis([-lx/2 lx/2 -ly/2 ly/2]);
%legend('Fontes de luz', 'Recetor', string, 'Posicao media
calculada do recetor');

```

```

%      drawnow
%      frame = getframe(1);
%      im = frame2im(frame);
%      [A,map] = rgb2ind(im,256);
%      imwrite(A,map,filename,'gif','WriteMode','append','
DelayTime',1);

else
    legend('boxoff');
    emax = max(errorTrila(:));
    %emax = 7.6343;
    meshc(x, y, (errorTrila./emax).*100);
    size((errorTrila./emax).*100)
    colormap(gca,jet);
    xlabel('X (m)');
    ylabel('Y (m)');
    zlabel('error (m2)');
    errorTrila(isnan(errorTrila))=[];
    medTrila=mean(mean(errorTrila));
    title(['Mean Error: ' num2str(medTrila) 'm Max Error: '
        num2str(max(max(errorTrila))) 'm Min Error: ' num2str(min
        (min(errorTrila))) 'm']);
    axis([-lx/2 lx/2 -ly/2 ly/2 0 100]);
    colorbar;
    set(gca, 'Clim', [0, 100]);
    hold off;
end

```

A.3.2 Pic32

```
#include <xc.h>
#include <plib.h>
#include <p32xxxx.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdint.h>
#include <time.h>
```

```
#include <math.h>
#include "globalFunction.h"
#include "uart_control.h"
```

```
#define L 5000
#define Fs 150000
#define indmax 20
#define t 100
```

```
short e=0, q=0;;
uint16_t freqref = 0;
uint16_t d=0;
uint16_t angulo[t] = {0};
uint16_t angulo2[t] = {0};
uint32_t asom=0;
unsigned short g=0;
uint16_t ind = 0;
uint16_t AN0[L], AN1[L], AN2[L], AN3[L], AN4[L], AN5[L], AN6[L],
```

```

AN7[L];

struct Value {
    uint16_t angs;
    uint16_t freqs;
};
struct Value r;

// devolve o angulo frequencia e a forca do sinal em mV
struct Value angle_freq_volt(void){

    uint16_t i;
    uint16_t max[8] = {0,0,0,0,0,0,0,0};

    max[0] = maximo(AN0,L);
    max[1] = maximo(AN1,L);
    max[2] = maximo(AN2,L);
    max[3] = maximo(AN3,L);
    max[4] = maximo(AN4,L);
    max[5] = maximo(AN5,L);
    max[6] = maximo(AN6,L);
    max[7] = maximo(AN7,L);

    uint16_t mediaFotodiodo[8] = {0,0,0,0,0,0,0,0};
    mediaFotodiodo[0] = ((maximo(AN0,L) + minimo(AN0,L))/2);
    mediaFotodiodo[1] = ((maximo(AN1,L) + minimo(AN1,L))/2);
    mediaFotodiodo[2] = ((maximo(AN2,L) + minimo(AN2,L))/2);
    mediaFotodiodo[3] = ((maximo(AN3,L) + minimo(AN3,L))/2);

```

```

mediaFotodiodo[4] = ((maximo(AN4,L) + minimo(AN4,L))/2);
mediaFotodiodo[5] = ((maximo(AN5,L) + minimo(AN5,L))/2);
mediaFotodiodo[6] = ((maximo(AN6,L) + minimo(AN6,L))/2);
mediaFotodiodo[7] = ((maximo(AN7,L) + minimo(AN7,L))/2);

uint16_t sinal = minimo(max, 8);
float sinal2 = sinal * 1.05;
if(sinal2 >= maximo(max,8))
{
    uart_putstr("\r                %Nao esta a receber sinal.
                \r");

    g=0;
    e=0;
    freqref = 0;
} else
{
    uint16_t angulos[8] = {9000, 7900, 6850, 5850, 4800,
        3750, 2750, 1800};
    uint16_t freq[8] = {frequencia(AN0), frequencia(AN1),
        frequencia(AN2), frequencia(AN3), frequencia(AN4),
        frequencia(AN5), frequencia(AN6), frequencia(AN7)};
    uint32_t ang;
    struct Value result;
    uint16_t maxsum=0;

    uint32_t prod_soma = 0;
    uint32_t soma_ener = 0;

```

```

uint16_t max2 = 0;
int16_t sinal_med = 0;
short k=0;
for(i = 0; i<8; i++){
    if( max[i] > max2 && freq[i]!=0){
        max2 = max[i];
        k=i;
    }
}
if(e==0){ //se nao ha freq de referencia
    freqref=freq[k];
    uart_putstr("\n\rfreqref = "); imprimirInt(freqref);
    e=1;
}
if(freq[k]==freqref && freq[k]!=0){
    sinal_med = mediaFotodiodo[k]*(3300/1023);
    prod_soma = mediaFotodiodo[k]*angulos[k];
    soma_ener = mediaFotodiodo[k];
    uart_putstr("\n\r    %Photodiodo ");
    imprimirInt(k+1); uart_putstr(" = ");
    imprimirInt(freq[k]);
    uart_putstr(" ] Hz; Vmed = ");
    imprimirInt(sinal_med); uart_putstr(" [mV];");
    maxsum = maxsum + sinal_med;

    if(freq[k-1]==freqref && freqref==freq[k+1]){
        if(mediaFotodiodo[k-1]>=mediaFotodiodo[k+1]){
            prod_soma = prod_soma +

```

```

        mediaFotodiodo[k-1]*angulos[k-1];
soma_ener = soma_ener + mediaFotodiodo[k-1];
sinal_med = mediaFotodiodo[k-1]*(3300/1023);
uart_putstr("\n\r    %Phtodiodo ");
    imprimirInt(k); uart_putstr(" = ");
    imprimirInt(freq[k-1]);
uart_putstr("] Hz; Vmed = ");
    imprimirInt(sinal_med); uart_putstr("
[mV];");
maxsum = maxsum + sinal_med;
} else {
    prod_soma = prod_soma +
        mediaFotodiodo[k+1]*angulos[k+1];
soma_ener = soma_ener + mediaFotodiodo[k+1];
sinal_med = mediaFotodiodo[k+1]*(3300/1023);
uart_putstr("\n\r    %Photdiodo ");
    imprimirInt(k+2); uart_putstr(" = ");
    imprimirInt(freq[k+1]);
uart_putstr("] Hz; Vmed = ");
    imprimirInt(sinal_med); uart_putstr("
[mV];");
maxsum = maxsum + sinal_med;
}
} else if (freq[k-1]==freqref){
    prod_soma = prod_soma +
        mediaFotodiodo[k-1]*angulos[k-1];
soma_ener = soma_ener + mediaFotodiodo[k-1];
sinal_med = mediaFotodiodo[k-1]*(3300/1023);

```

```

    uart_putstr("\n\r    %Phodiado ");
        imprimirInt(k); uart_putstr(" = [");
        imprimirInt(freq[k-1]);
    uart_putstr("] Hz; Vmed = ");
        imprimirInt(sinal_med); uart_putstr("
[mV];");
    maxsum = maxsum + sinal_med;
} else if (freq[k+1]==freqref){
    prod_soma = prod_soma +
        mediaFotodiado[k+1]*angulos[k+1];
    soma_ener = soma_ener + mediaFotodiado[k+1];
    sinal_med = mediaFotodiado[k+1]*(3300/1023);
    uart_putstr("\n\r    %Phodiado ");
        imprimirInt(k+2); uart_putstr(" = [");
        imprimirInt(freq[k+1]);
    uart_putstr("] Hz; Vmed = ");
        imprimirInt(sinal_med); uart_putstr("
[mV];");
    maxsum = maxsum + sinal_med;
}

ang = prod_soma/soma_ener;
if (ang!=0){
    uart_putstr(" Sinal medio:
");imprimirInt(maxsum); uart_putstr("mV");
    g++;
    struct Value result = {ang, freqref};
    return result;
}

```



```

    }
    else{
        struct Value result = {0, 0};
        return result;
    }
}
else{
    q++;
    if(q>100){
        e=0;
        freqref=0;
        g=0;
        q=0;
    }
}
}
}

```

```

// Frequencia
uint16_t frequencia(uint16_t s[]){
    // Variaveis auxiliares
    unsigned int i;
    float f, fr = 0;
    short p;
    uint16_t P[indmax];
    uint16_t N[indmax];
    unsigned short zp = 0;
    unsigned short zn = 0;

```

```

uint16_t med = ((maximo(s,L) - minimo(s,L))/2) +
    minimo(s,L); // media do sinal recebido
uint16_t U = 2;
uint16_t tranP = 0;
uint16_t tranN = 0;

for(i = 0; i < indmax; i++ )
{
    N[i] = 0;
    P[i] = 0;
}
// Condicao para verificar onde se encontra o sinal
if(s[0] < med){
    p = -1;          // Positivo
}
else{
    p = 1;          // Negativo
}

//Contagem de valores
for(i=0; i < L; i++)
{
    // Transicao Negativa
    if(p == 1 && s[i] < med)
    {
        if(abs(s[i] - med) > U)
        {
            tranN++;
        }
    }
}

```

```

        p = -1;           // mudar de estado
    }
}
// Transicao Positiva
if(p == -1 && s[i] > med)
{
    if(abs(s[i] - med) > U)
    {
        tranP++;
        p = 1;           // mudar de estado
    }
}
// CONTAGEM NEGATIVA DESCE A PRIMEIRA TRANSICAO
if((tranN > 0) && (tranN < indmax))
{
    N[tranN]++;
}
// CONTAGEM POSITIVA DESCE A PRIMEIRA TRANSICAO
if((tranP > 0) && (tranP < indmax))
{
    P[tranP]++;
}

}

// Passou ate aqui!!! =>
for(i = 0; i < indmax; i++)
{

```

```

    if (N[i] != 0)
    {
        zn++;
    }
    if (P[i] != 0)
    {
        zp++;
    }
}

if (zn != 0 && zp != 0)
{
    zn = (float) zn;
    zp = (float) zp;

    fr = (2*Fs) / ((soma(N, indmax) / zn) + (soma(P, indmax) / zp));
    if (fr > 700 && fr < 2000) {
        f = 1000;
    }
    else if (fr >= 2000 && fr <= 3800) {
        f = 3000;
    }
    else if (fr > 3800 && fr < 5600) {
        f = 4000;
    }
    else {
        f = 0;
    }
}

```

```

        return f;
    }
}

// Leitura das ADCs
void time_for_read_voltage(void){
    AN0[ind] = ADC1BUF0;
    AN1[ind] = ADC1BUF1;
    AN2[ind] = ADC1BUF2;
    AN3[ind] = ADC1BUF3;
    AN4[ind] = ADC1BUF4;
    AN5[ind] = ADC1BUF5;
    AN6[ind] = ADC1BUF6;
    AN7[ind] = ADC1BUF7;

    IFS1bits.AD1IF = 0;
}

```

codigo.c

